

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica



TESIS DOCTORAL

**Estudio medioambiental de materiales y compuestos avanzados para
centrales termosolares de receptor central de torre con
almacenamiento térmico**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Carlos Mayo del Río

Directores

**Francisco Javier Pérez Trujillo
Ricardo Díaz Martín**

Madrid, 2017

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
Facultad de Ciencias Químicas
Departamento Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica



ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL DE MATERIALES Y
COMPUESTOS AVANZADOS PARA CENTRALES
TERMOSOLARES DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE CON
ALMACENAMIENTO TÉRMICO

TESIS DOCTORAL

Director:

Dr. Francisco Javier Pérez
Dr. Ricardo Díaz Martín

Carlos Mayo del Río

Madrid 2016

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a quien me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento siento próximo ayudándome a conocer mis aciertos y errores permitiéndome aprender de ellos. Eres quien guía el destino de mi vida.

Mi agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo han facilitado la realización de esta tesis, en especial a mis directores, los Doctores D. Francisco Javier Pérez Trujillo y D. Ricardo Díaz Martín, mis amigos, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación, el apoyo y los sabios consejos recibidos a lo largo de estos años, a su manera, han conseguido ganarse mi lealtad y admiración. Extiendo este agradecimiento a mi compañera de trabajo, Esperanza que me permitió profundizar en la técnica del Análisis de Ciclo de Vida, a Carlos Gregorio por sus consejos y apoyo en la configuración de esta tesis y al resto de compañeros del Departamento de Ingeniería de Superficies, Isabel, Teresa y Gustavo, así como al resto del mismo que han facilitado la culminación de este trabajo.

Gracias Ángeles por tu apoyo, has sido sumamente importante, estuviste a mi lado en todo momento, siempre ayudándome. No resultó fácil culminar con éxito este trabajo, sin embargo, siempre fuiste mi estímulo, me ayudaste hasta donde te era posible, incluso más que eso. A David y Paula que han sufrido pacientemente mis diferentes estados emocionales aparecidos durante la realización de este trabajo, gracias.

No quiero olvidarme de mi gran amigo Bobby por hacerme el trabajo más llevadero durante los calurosos meses de agosto en los que se desarrolló gran parte del trabajo.

Mención especial a mi Madre, mis hermanas y mi Padre allá donde esté.

A todos, gracias.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1.- OBJETIVO	12
1.2.- EL PAPEL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES. SITUACIÓN ACTUAL	13
1.3.- ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN. REVISIÓN TECNOLÓGICA	15
1.3.1.- Tecnología CSP de Disco Parabólico “STIRLING”	23
1.3.2.- Tecnología CSP “FRESNEL”	27
1.3.3.- Tecnología CSP Cilindro-Parabólica	30
1.4.- TECNOLOGÍA CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE	32
1.4.1.- Tecnología de receptor de torre “Beam Down”	35
1.4.2.- Funcionamiento de un receptor de torre	36
1.4.3.- Tipos de receptores de torre	38
1.4.4.- Componentes de la tecnología CSP de receptor central de torre	43
1.4.5.- Estado tecnológico de las CSP de receptor central de torre.....	59
1.5.- EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	62
1.5.1.- Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	66
1.5.2.- Ámbito general y Etapas de un ACV	71
1.5.2.1.- Definición de Objetivo y Alcance.....	74
1.5.2.2.- Análisis de Inventario	75
1.5.2.3.- Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.....	77
1.5.2.4.- Interpretación de Resultados.....	87
1.5.2.5.- Métodos de evaluación en un ACV	88
1.5.3.- Software utilizado	109
1.5.3.1.- Métodos considerados en SimaPro	112
1.5.3.2.- SAM (System Advisor Model)	113
1.5.3.2.1.- Estructura del Modelo.....	114
1.5.3.2.2.- Datos aportados para las centrales a estudio.....	116
2. ESTADO DEL ARTE	135
2.1.- INSTALACIONES CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE	138
2.2.- ALMACENAMIENTO TÉRMICO	148
2.2.1.- Almacenamiento térmico mediante sales fundidas	152
2.3.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN TECNOLOGÍAS SOLARES.....	156
3. MATERIALES Y COMPUESTOS EN CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO	165
3.1.- ALEACIONES PARA APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA EN CSP.....	165
3.1.1.-Acero inoxidable austenítico AISI 347H	169
3.1.2.-Superalcación termo-resistente HRSA tipo INCONEL 617	170
3.2.- SALES FUNDIDAS PARA ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN CSP	171
3.2.1.- Sal Solar binaria (60%NaNO ₃ + 40%KNO ₃).....	173
3.2.2.- Sal Solar Ternaria “Hitec” (40%NaNO ₂ + 7% NaNO ₃ + 53%KNO ₃).....	175
3.3.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE LAS ALEACIONES CONSIDERADAS	177

3.3.1.- Análisis de Ciclo de Vida acero inoxidable AISI 347H	187
3.3.2.- Análisis de Ciclo de Vida Superalación HRSA INCONEL 617	195
3.4.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE LAS SALES CONSIDERADAS.....	203
3.4.1.- Análisis de Ciclo de Vida de la Sal Solar binaria	205
3.4.2.- Análisis de Ciclo de Vida de la Sal Solar Ternaria “Hitec”	209
 4. DEGRADACIÓN DE MATERIALES Y COMPUESTOS POR EFECTO DE ALTA TEMPERATURA	217
 4.1.- DEGRADACIÓN DE LAS ALEACIONES CONSIDERADAS POR EFECTO DE LAS SALES FUNDIDAS	227
4.2.- DEGRADACIÓN DE LAS SALES FUNDIDAS.....	229
 5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LAS CENTRALES CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE SELECCIONADAS	237
 5.1.- OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV	238
5.2.- MODELIZACIÓN DE LAS CSP DE RECEPTOR CENTRAL SELECCIONADAS	240
5.3.- RESULTADOS OBTENIDOS	249
5.3.1.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las aleaciones.....	249
5.3.2.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las sales fundidas	252
5.3.3.- Evaluación medioambiental de cada configuración de Planta.....	256
5.3.3.1.- ACV Planta 19 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Binaria	256
5.3.3.2.- ACV Planta 19 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”.	263
5.3.3.3.- ACV Planta 100 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Binaria	268
5.3.3.4.- ACV Planta 100 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”.....	274
5.3.4.- Evaluación medioambiental comparativa de cada configuración	279
5.3.4.1.- Evaluación medioambiental comparativa entre Plantas de 19 MWe.....	280
5.3.4.2.- Evaluación medioambiental comparativa entre Plantas de 100 MWe.....	286
 6. RESUMEN GENERAL Y CONTRIBUCIONES RELEVANTES	293
 6.1.- CONTRIBUCIONES RELEVANTES.....	293
6.1.1.- Sobre los materiales supuestos en el estudio	293
6.1.2.- Sobre los compuestos para almacenamiento térmico (sales fundidas) supuestos en el estudio	295
6.1.3.- Sobre la Planta CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria	296
6.1.4.- Sobre la Planta CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”	297
6.1.5.- Sobre la Planta CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria	299
6.1.6.- Sobre la Planta CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”	300
6.1.7.- Sobre el ACV comparativo entre Plantas CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria/Sal Solar Ternaria “Hitec”	303
6.1.8.- Sobre el ACV comparativo entre Plantas CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria/Sal Solar Ternaria “Hitec”	304

7. CONCLUSIONES FINALES	309
7.1.- RESUMEN.....	309
7.2.- APORTES.....	315
7.3.- FUTURAS CONTRIBUCIONES.....	317
8. RESUMEN.....	321
INTRODUCCIÓN	321
OBJETIVOS	322
RESULTADOS	323
CONCLUSIONES	326
9. SUMMARY	331
INTRODUCTION	331
OBJECTIVES	332
RESULTS	333
CONCLUSIONS	336
10.-BIBLIOGRAFÍA	339



INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La energía juega un papel primordial en cada dimensión del desarrollo sostenible bien sea económico, social o ambiental. Los servicios energéticos sustentan la actividad económica, permiten mantener las necesidades básicas, como la alimentación y la vivienda y contribuyen al desarrollo social mediante la mejora de sectores como la educación y la salud pública. El acceso a servicios modernos de energía también puede ser beneficioso para el medio ambiente, por ejemplo, mediante la reducción de la deforestación y la disminución de la contaminación causada por los equipos y procesos ineficientes.

Pero pueden darse situaciones conflictivas: el crecimiento del consumo energético puede conllevar el rápido aumento de los niveles absolutos de la contaminación y el agotamiento de los recursos. El desarrollo sostenible permite las compensaciones adecuadas de este problema.

Por lo tanto, la energía es un bien estratégico, y la garantía de su disponibilidad es un aspecto importante de la responsabilidad última de los gobiernos para la seguridad nacional y el crecimiento económico. Las circunstancias políticas y económicas de cada país determinan la combinación de los combustibles necesarios para contribuir a la seguridad energética colectiva, al crecimiento económico, y para hacer frente al reto de lograr un desarrollo sostenible.

La generación, transporte y uso de la energía acarrea una serie de costes económicos y medioambientales de tal forma que cada país debería seleccionar la combinación de combustibles que considere más apropiado, es decir, petróleo, gas, carbón, energía nuclear o las energías renovables en función, sobre todo, de la disponibilidad de bienes y recursos de los que esté dotado.

Se estima, que la potencia necesaria, hoy en día para satisfacer la demanda mundial es de aproximadamente 12,5 TW¹ (sólo se contempla el uso final de la energía, excluye las pérdidas en la producción y transporte). En términos de energía primaria, cerca del 35 % proviene del petróleo, el 27% del carbón, el 23% del gas natural, el 6% de

¹ Energy Information Administration (EIA), “*International Energy Outlook*”, Washington, D.C., 2008.

las centrales nucleares, y el resto de biomasa, solar, eólica y geotérmica. La energía eléctrica suministrada es algo más de 2 TW del uso final total.

Cuando se habla de la cuestión energética, se han de tener en cuentas diversas consideraciones como son el crecimiento global de la población, el creciente desarrollo de algunos países, los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La generación de energía eléctrica supone un importante porcentaje de las emisiones CO₂ vinculado a su producción. Se trata de un gas que contribuye al efecto invernadero y al cambio climático por el efecto de la actividad humana. El aumento del número de plantas de energías renovables no hidroeléctricas para la generación de energía eléctrica, así como las mejoras tecnológicas, ha permitido el descenso de emisiones y por tanto el valor indicativo de la huella de carbono.

Durante los últimos años, la contribución del sector de las energías renovables para la generación de energía eléctrica en el mundo sigue creciendo y este hecho redunda en los beneficios ambientales asociados con tecnologías como la energía solar concentrada (CSP) o centrales solares de potencia.

La generación de energía eléctrica mediante las fuentes de energías renovables conlleva pequeñas cargas ambientales, hecho demostrado mediante la técnica de análisis de ciclo de vida (ACV), tratándose del método más adecuado para la determinación de los impactos ambientales. El ACV representa los impactos asociados a todas las etapas del ciclo de vida de una planta CSP, normalmente durante un período de 30 años, que incluye entre otras la extracción de materias primas, procesado de componentes, construcción de plantas, operación, mantenimiento y desmantelamiento.

En el año 2011 el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) publicó un ACV de una planta CSP con tecnología Cilindro-Parabólica, situada en Daggett, California². El inventario de materiales para el ciclo de vida de este estudio y los datos de rendimiento para una planta de 103 MW junto con los datos aportados por el bloque de potencia para un período de 6.3 horas de almacenamiento térmico en sales fundidas (TES) fueron proporcionados por el grupo Worley Parsons. En este análisis de ciclo de vida se

² Burkhardt J., Heath G., Turchi C., “*Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*”. Environmental Science & Technology, N°45 (6), pág.2457–2464, 2011.

evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de agua y la demanda de energía acumulada. Posteriormente se incluyeron como alternativas al estudio, el bloque de potencia de refrigeración húmeda, la configuración del almacenamiento térmico y el medio de almacenamiento para conseguir un espectro más amplio del impacto medioambiental que podría suceder en plantas similares desarrolladas en USA.

De forma análoga a este ACV efectuado por NREL para la planta de receptores cilindro parabólicos, mediante este trabajo se efectuará el análisis de ciclo de vida comparativo de diferentes plantas CSP con la tecnología de receptor central de torre “*Power Tower*” y diferentes potencias generadas por algunas de ellas teniendo en cuenta dos tipos de sales fundidas (sal solar binaria y “Hitec”) los tipos y cantidades de materiales empleados que quedarán limitados a la torre, los conductos, los tanques de almacenamiento de sales y el intercambiador. De esta forma se obtendrán los diferentes impactos ambientales de los diferentes materiales y compuestos comentados utilizando datos de inventario publicados en las diferentes bases de datos existentes.

El presente estudio representa un paso importante en la realización de un ACV para el funcionamiento y almacenamiento térmico de este tipo de tecnología CSP que, junto con el campo de heliostatos, representa la mayor parte del inventario de la planta completa y que se correspondería a la misma proporción en emisiones de GEI³.

³ Lechon Y., de la Rúa C., Saez R., “*Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solar Thermal Technology in Spain*” Paper B5-S5. 13th SolarPACES International Symposium, Seville, Spain, pág.20-23, 2006.

1.1.- Objetivo

En la actualidad, la generación de energía eléctrica pasa por el avance tecnológico de los recursos renovables que permitan un suministro continuo y prolongado, sostenible económica y medioambientalmente. Mediante esta tesis se detallará el uso de esta tecnología con el fin de afianzar su capacidad de generación energética frente a otro tipo de tecnologías en activo, menos respetuosas con el medio ambiente.

El principal objetivo de esta tesis consiste en el análisis medioambiental comparativo para la tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP) en plantas de receptor de torre central con almacenamiento térmico mediante sales fundidas, de dos centrales térmicas de diferente potencia y en la misma ubicación, con la finalidad de conocer cual, de ellas es medioambientalmente, más respetuosa con el medio ambiente en función del uso de dos aleaciones específicas para los sistemas considerados y dos tipos de compuestos de almacenamiento térmico diferentes. Para este propósito se realizará un análisis de ciclo de vida (ACV), primeramente, de las aleaciones utilizadas para los sistemas de la planta considerados y sales fundidas como compuestos para el almacenamiento térmico, realizando posteriormente un ACV comparativo de cada una de las plantas implicadas en el estudio para estos dos tipos de sales fundidas seleccionados.

Diferentes evaluaciones de ACV en este tipo de tecnología conducen a resultados de bajo impacto ambiental y alto retorno energético durante el período de vida de las plantas consideradas.

Para el desarrollo de estos estudios se ha utilizado la aplicación informática SimaPro8 con el IPPC, (panel intergubernamental para el cambio climático), CED (demanda energética acumulativa) y diferentes metodologías para conseguir un enfoque orientado a la valoración de los diferentes tipos de daños.

Las principales tareas desarrolladas en esta tesis son los siguientes:

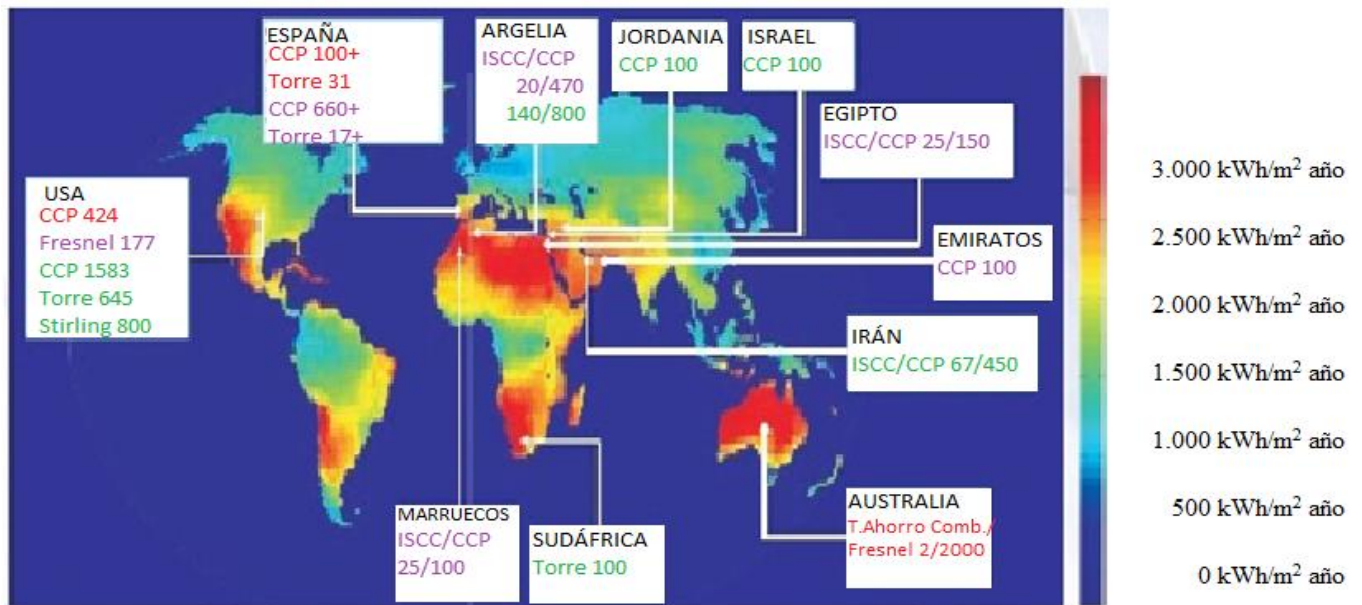
- Descripción de los aspectos principales sobre la relación del sol con la energía solar.
- Descripción de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Descripción de las principales tecnologías termosolares.

- Fundamentos teóricos sobre las aleaciones implicadas en el estudio, así como el comportamiento de los compuestos para almacenamiento térmico considerados.
- Evaluación del Ciclo de Vida de las aleaciones, compuestos de almacenamiento térmico y centrales CSP de receptor central e torre.
- Análisis comparativo entre los ACV de cada una de las centrales con el fin de cuantificar los impactos medioambientales para diferentes potencias que arbitren la sostenibilidad de la central.

1.2.- El papel de las Energías Renovables. Situación actual

La emisión energética anual del sol es alrededor de 4000 veces mayor que la energía consumida lo cual revela que se trata de una fuente energética subestimada y poco aprovechada en relación a sus posibilidades. El aprovechamiento de dicha energía consiste en la captación de la radiación solar mediante diferentes tecnologías y su aplicación posterior a diferentes fines como puede ser el calentamiento de fluidos o la generación de electricidad. El territorio español, dada su privilegiada climatología y situación geográfica, se encuentra favorecido frente al resto de los países europeos debido a que sobre cada m^2 de suelo recibe al año alrededor de 1.500 KWh de energía similar a muchas regiones de América del Sur y Central. Esta energía puede utilizarse directa o indirectamente y transformarse en otras formas útiles como puede ser la electricidad.

La cantidad de energía generada por fuentes renovables debería incrementarse de manera considerable para conseguir una apreciable reducción en las emisiones de CO_2 . Como consideración al respecto, por cada MW_h que se genera en una central termosolar se consigue una reducción en las emisiones de CO_2 de entre 2 y 3 Toneladas del mismo por lo que se evita la incineración de cerca de 90.000 Toneladas de lignito o el equivalente a 30.000 toneladas de petróleo por año.



Capacidades existentes; Capacidades bajo construcción; **Capacidades programadas;** #: Capacidad en MW_e; +: Indica almacenamiento en grandes cantidades (la capacidad de la planta termosolar es mayor que la capacidad eléctrica indicada); #/y: Para sistemas de ciclo combinado o de ahorro de combustible, #, indica la capacidad solar, y, indica la capacidad global.

Capacidad Total Instalada → 600 MW

Tecnología Cilindro-Parabólica → Tecnología más madura

Tecnología de Torre → Tecnología con más futuro

Tecnología “Stirling” → Tecnología pendiente de madurar

Figura 1.1: Logros a nivel mundial en la generación de potencia mediante tecnologías CSP.

Fuente: Anudeep Yadav, Roll nº10; MBA-Power Management, NPIT

Actualmente, la energía solar es la más favorecida por este compromiso apareciendo centrales solares mejoradas que consiguen un incremento considerable en sus rendimientos energéticos por diferentes sistemas de almacenamiento de energía cuya meta es la de proporcionar el consumo necesario diario. Los avances tecnológicos en este campo establecen un equilibrio necesario debido a que las cantidades de CO₂ generadas por la fabricación, instalación y servicio con una media de duración de una turbina solar, de 20 años, se compensan después de los seis primeros meses de funcionamiento. Esta tecnología no contribuye al cambio climático y su agotamiento es inapreciable encontrándonos en un punto de desarrollo exponencial en el cinturón solar terrestre.

Ante esta perspectiva, todo lo relacionado con la preservación del medio ambiente incorpora importantes movilizaciones en los diferentes sectores sociales gubernamentales y sociedad civil. Tanto las inquietudes arrastradas en otros momentos respecto al futuro, como las opiniones meramente ideológicas, han sido sustituidas por intervenciones que persiguen moderar en parte los efectos adversos, provocados por la actividad humana.

Esta actitud, basada en los principios de desarrollo sostenible, está alcanzando cierto carácter estratégico en determinados sectores productivos, favoreciendo el dominio de nuevos mercados en una economía cada vez más globalizada.

La generación de energía se muestra como un sector en el que los daños ambientales y la explotación de recursos tienen mayor incidencia ya que al tratarse de un ámbito industrial, su actividad sobre el entorno, empeora su imagen de cara a la sociedad.

Con lo expuesto hasta ahora, se puede entender la existencia de consenso sobre la solución al problema energético mundial y verdaderamente son las energías renovables las que puedan garantizar un desarrollo sostenible pero hasta que las técnicas de producción de estas energías se desarrollen plenamente, se pueden mejorar las instalaciones de producción energética actuales en el proceso productivo y en el diseño de nuevos materiales y compuestos utilizados en estos procesos buscando un óptimo de durabilidad y mínimo daño ambiental en su fabricación y en su comportamiento en servicio.

1.3.- Energía Solar Térmica de Concentración. Revisión tecnológica

Un factor clave en la explotación de la energía proporcionada por el sol es el uso de la tecnología CSP. Los receptores de la radiación solar o espejos empleados en estas tecnologías se utilizan para concentrar la radiación solar en un punto central. La energía acumulada se utiliza para calentar un fluido con el fin de generar energía eléctrica mediante el generador de un bloque de potencia o para calentar un medio de almacenamiento térmico que permite que la energía almacenada pueda ser utilizada, más tarde, cuando varíen las condiciones de trabajo de la planta. La Figura 1.2 muestra el principio de funcionamiento de una planta CSP de receptor central.

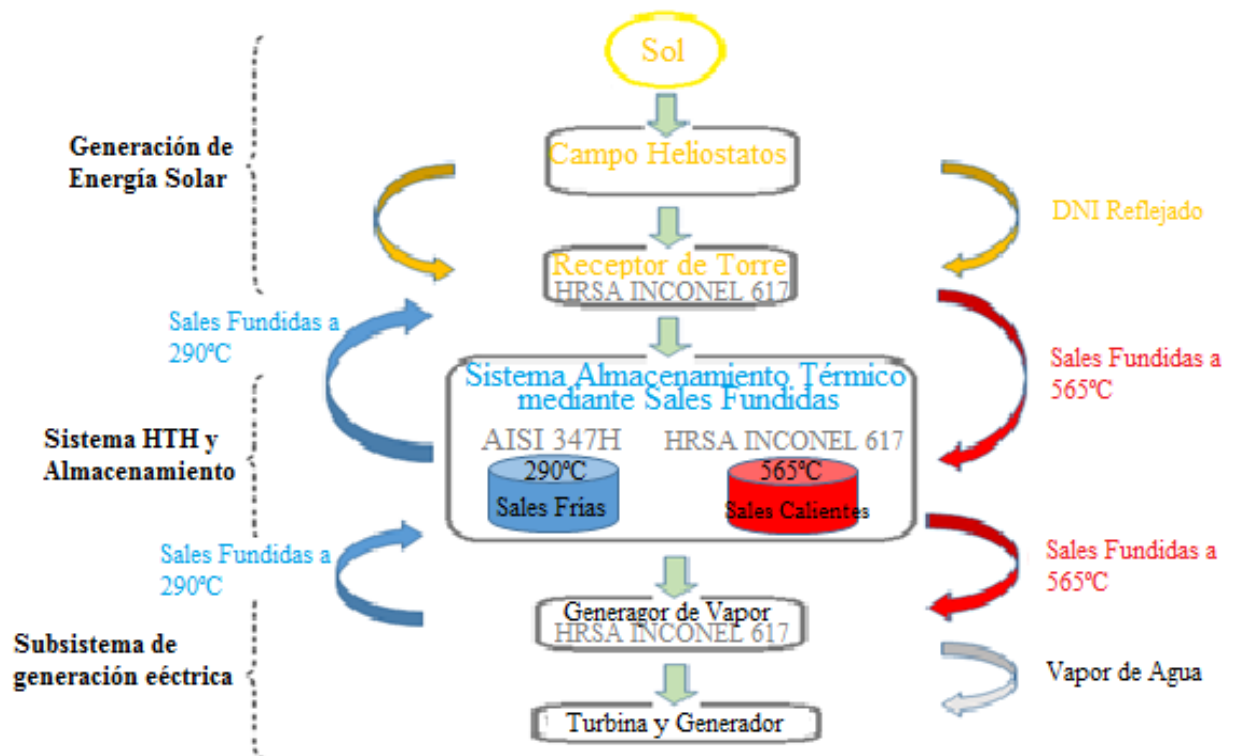


Figura 1.2: Funcionamiento de una planta CSP de receptor central.

Fuente: Elaboración propia

La tecnología CSP de receptor central de torre es relativamente nueva si se compara con la Cilindro-Parabólica y ha experimentado, en la última década, un crecimiento significativo respecto a las demás. Existe una revisión económica comparativa, de diferentes tecnologías, colectores cilindro-parabólicos, disco Stirling y receptor central de torre, realizada en el año 2013 y llegando a la conclusión de que la tecnología de disco Stirling consigue generar energía eléctrica, por unidad, a un coste inferior que las otras dos tecnologías⁴. Por otro lado, otros autores⁵, han realizado una comparativa entre las tecnologías Cilindro-Parabólica y de receptor central de torre en la que exponen las mayores ventajas que aportan las segundas sobre las primeras y aportando un método para la estimación de las horas de haces de flujo de radiación solar mensuales.

⁴ Reddy V. Siva, Kaushik S.C., Ranjan K.R., Tyagi S.K. “*State of the Art Solar Thermal Power Plants - A Review*” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

⁵ Zhang H.L., Baeyens J., Degreve J., Caceres G., “*Concentrated Solar Power Plants: Review and Design Methodology*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.

La primera planta, con este tipo de tecnología y almacenamiento térmico, es la GEMASOLAR, descrita ampliamente en la bibliografía⁶ y en la cual se trata en profundidad sus características, construcción, puesta en marcha y mantenimiento. En lo referente al rendimiento aportado por este tipo de plantas, se han realizado evaluaciones en la termosolar Jülich mediante ensayos con el sistema de almacenamiento térmico funcionando a máxima capacidad mediante ciclos que aportaron altas tasas de transferencia térmica y bajas pérdidas de calor⁷.

Otros estudios realizados sobre esta misma planta, han desarrollado los diferentes mecanismos y procedimientos que permiten la implementación de esta tecnología, para otras plantas de diferente escala⁸.

En cuanto a la incidencia de la radiación, se ha estudiado, sobre la termosolar Dahan de 1 MW_e por modelado y simulación, la generación de curvas de respuesta ante diferentes cambios en la irradiación solar, demostrando la independencia de estos cambios mediante el estudio de la presión de flujo a la salida del receptor, pero se observó una mayor respuesta del receptor en cuanto a la temperatura de salida del fluido y la potencia generada⁹.

En cuanto a la hibridación en este tipo de tecnología, se han realizado estudios como el correspondiente a la planta SOLUGAS, que se trata del primer sistema híbrido con turbina de gas, llegando a la conclusión de que es posible la incorporación de almacenamiento térmico, mejoras en la turbina y distribución del receptor para un funcionamiento satisfactorio de la planta en cuanto a su capacidad y rendimiento¹⁰.

⁶ Burgaleta, J.I., Arias, S., Ramirez. D. “*GEMASOLAR, the first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage*”, 2011.

⁷ Zunft S., Hanel M., Kruger M., Volker Dreißigacker F., Gohring E. “*Julich Solar Power Tower - Experimental Evaluation of the Storage Subsystem and Performance Calculation*” ASME, 2011.

⁸ Koll G., Schwarzbozl P., Hennecke K., Hartz T., Schmitz M., Hoffschmidt B. “*The Solar Tower Jülich - A research and demonstration plant for central receiver systems*”. 15th Proceedings SolarPACES, 2009.

⁹ Ershu Xu, Qiang Yu, Zhifeng Wang, Chenayao Yang. “*Modeling and simulation of 1 MW DAHAN solar thermal power tower plant*”, Elsevier Science Direct, 2010.

¹⁰ Queroa M., Korzynietzb R., Ebertc M., Jiménez M., Del Río A., Briosoa J.A. “*Solugas – Operation experience of the first solar hybrid gas turbine system at MW scale*”. Elsevier Science Direct, 2013.

El estudio del rendimiento aportado por este tipo de centrales, se puede consultar en la bibliografía uno pormenorizado de la central termosolar SIERRA SUN TOWER en el que se comprueba la caracterización de su rendimiento¹¹.

Romero et al. en el año 2002, aportan una revisión de las tecnologías de receptor central de torre existentes en ese momento¹² y se observa que la tecnología CSP más favorable para el futuro es la de receptor central de torre ya que permite alcanzar temperaturas más elevadas que el resto de tecnologías CSP disponibles. La tecnología CSP de receptor central de torre o también conocida como torre de potencia consta de múltiples espejos llamados heliostatos que reflejan la radiación solar a un punto central (receptor) para calentar un fluido de transferencia de calor (HTF) que a su vez se utiliza para calentar un fluido de trabajo que permitirá la generación de energía eléctrica.

Cuando a este sistema se acopla un medio de almacenamiento térmico de energía (TES), tiene la capacidad de producir energía en condiciones ambientales adversas, pero no todos los tipos de centrales solares de potencia destinada a la generación de energía eléctrica tienen capacidad de almacenamiento energético^{13,14}.

Para la concentración de la radiación solar, la mayoría de los sistemas utilizan espejos o heliostatos debido a su gran reflectividad y dicha concentración se debe a dos tipos:

- **Concentración Puntual:** Se basa en la orientación puntual de los espejos sobre los que incide la radiación solar lo que permite alcanzar elevadas temperaturas. En este tipo de concentración se pueden incluir los sistemas de central de torre o los de disco Stirling.

¹¹ Meduri P.K., Hannemann C.R., Pacheco J.E. “*Performance characterization and operation of eSolar’s Sierra SunTower power tower plant*” 2010.

¹² Romero M., Buck R., Pacheco J.E. “*An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects and Technologies*”, ASME, 2002.

¹³ Skumanich A., CSP: *Developments in heat transfer and storage materials. Renewable Energy Focus*”. N°11(5), pág.40-43, 2011.

¹⁴ Barlev D., Vidu R. and Stroeve P. “*Innovation in concentrated solar power. Solar Energy Materials and Solar Cells*”. N°95 (10), pág.2703-2725, 2011.

- Concentración Lineal: Consiste en la concentración de la radiación solar sobre un receptor lineal que se encuentra situado por encima del espejo como es el caso de la técnica de concentradores cilindro-parabólicos o los del tipo “Fresnel”. Mediante estos sistemas se consiguen menores temperaturas que en los anteriores debido al menor grado de libertad en el seguimiento solar.

Si se revisa la teoría de la óptica clásica, se observa que el haz de rayos de luz que incide en un espejo esférico, viaja paralelamente al eje de este, se refleja en él y pasa a través del foco del mismo que se encuentra situado a una distancia $R/2$ del espejo, siendo R el radio del espejo. La energía de los rayos de luz incidentes, se concentran en ese punto produciendo calor puntual localizado, de ahí el nombre: Energía Solar Concentrada (CSP). Resumiendo, los sistemas CSP utilizan diferentes configuraciones espejo/reflector para convertir la energía solar en calor de alta temperatura. Este calor se puede utilizar directamente o se convierte en electricidad dependiendo de la aplicación final.

Los principales componentes de un sistema CSP son:

- Campo solar: Es el conjunto de espejos o reflectores que realmente recoge la radiación solar y la enfoca en el receptor solar. El campo, generalmente, se expresa en metros cuadrados que representa el área de superficie del conjunto de espejos, no el área de uso de la tierra.
- Receptor solar: Es la parte del sistema que transforma la radiación solar en calor. A veces, este receptor se encuentra integrado en el campo solar. En el receptor solar se utiliza un medio de transferencia de calor, por lo general agua, aceite, sales etc., para transportar el calor al sistema de conversión de energía.
- Almacenamiento térmico: Las plantas CSP pueden ser configuradas con almacenamiento térmico mediante diversos componentes. El almacenamiento térmico mediante sales fundidas ofrece una autonomía entre 3 y 15 horas de capacidad de respaldo energético. Con almacenamiento térmico aumenta significativamente la inversión a realizar en una instalación de CSP, aunque permite una mayor capacidad y gestionabilidad de la planta. Es una característica importante si se compara con otro tipo de tecnologías de energía renovable, como la fotovoltaica o la eólica, que carecen de esa función de almacenamiento.

- Sistema de conversión de energía: es el componente final del sistema y convierte el calor en formas utilizables de energía, electricidad o calor.

El conocimiento de la cantidad y calidad de la energía solar disponible en un lugar específico es de primordial importancia para el diseño de cualquier sistema de energía solar. Aunque la radiación solar (insolación) es relativamente constante fuera de la atmósfera de la Tierra, aproximadamente 1.367 W/m^2 , las influencias climáticas locales pueden causar grandes variaciones en la insolación disponible en la superficie de la tierra de un sitio a otro. Por otro lado, el movimiento relativo del sol con respecto a la tierra permitirá superficies con diferentes orientaciones para interceptar diferentes cantidades de energía solar. La Figura 3 muestra las regiones de alta insolación, donde los sistemas de conversión de energía solar aportan la máxima cantidad de energía a partir de un tamaño específico de un campo solar. Sin embargo, la energía solar es de libre disposición, y sólo el escalado del campo solar puede proporcionar la misma cantidad de calor o electricidad en las áreas sombreadas. Es la principal tarea del diseñador del sistema de energía solar para determinar la cantidad, calidad y oportunidad de la energía solar disponible en el sitio seleccionado para la instalación de un sistema de conversión de energía solar.

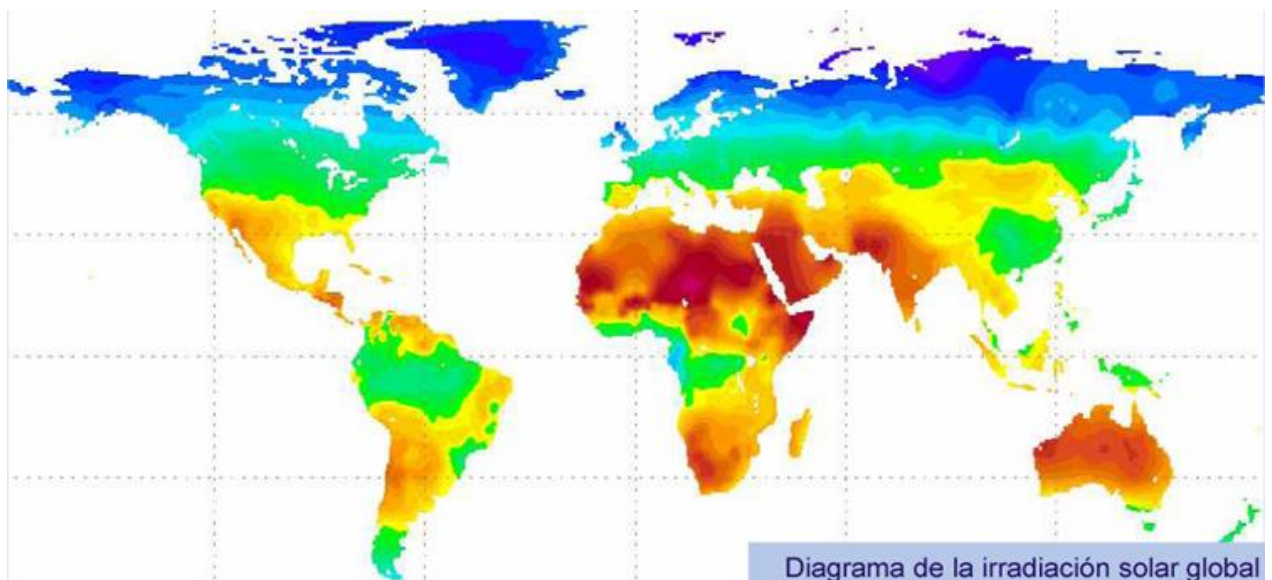


Figura 1.3: Mapa global del recurso solar.

Fuente: <http://www.solarforum-sh.org/warum-engagieren-wir-uns/>

La energía térmica solar utiliza la luz solar directa, llamada radiación o irradiación directa normal (DNI). Son los rayos solares que no se desviaron por el efecto de las nubes,

humos o polvo presentes en la atmósfera y que llega a la superficie de la tierra en haces paralelos y pueden ser concentrados.

Los lugares geográficos adecuados son los que presentan una gran cantidad de radiación solar directa, al menos 2.000 KWh/m² al año. Los sitios más favorecidos reciben más de 2.800 KWh/m² al año y las regiones típicas para incorporar las tecnologías CSP son los que no tienen grandes cantidades de humedad en el aire, sólidos en suspensión o humos. En estos se incluyen estepas, bosques de arbusto, sabanas y desiertos, siendo la posición ideal 40 grados de latitud norte o sur. Es por todo esto que las áreas más prometedoras del mundo incluyen el suroeste de USA, América Central y América del Sur, Norte y Sur de África, los países mediterráneos de Europa, el Cercano y Medio Oriente, Irán y las llanuras desérticas de la India, Pakistán, antigua URSS, China y Australia, como se puede apreciar en la Figura 1.3.

En estas regiones, 1 km² de tierra es suficiente para generar entre 100-130 GWh/año de electricidad mediante la tecnología solar térmica. Esta es la misma que la energía producida por una planta de combustión de carbón o gas de 50 MW¹⁵.

El colector solar intercepta la radiación solar entrante y la transforma en una forma utilizable de energía que puede ser utilizada para satisfacer una demanda específica. En particular, la temperatura del receptor aumenta hasta que la pérdida de calor debida a los fenómenos de convección y radiación en el receptor se iguala a la energía solar absorbida. La temperatura a la que esto ocurre se denomina temperatura de estancamiento del colector y es de suma importancia su control para la determinación de los puntos fríos. Para el control de la temperatura del colector en algún punto más frío que la temperatura de estancamiento, se ha de emplear la eliminación activa de calor y este calor se emplea su uso en un sistema de energía solar.

La disipación del calor se consigue mediante la circulación de un fluido por el receptor que puede tratarse de sales fundidas, aire, agua o aceite térmico. Para la eliminación de una gran parte de la energía solar absorbida como calor útil, la cantidad de calor perdido desde el receptor debe ser pequeño y la forma más común de reducir la pérdida de calor a temperaturas elevadas es reducir el tamaño de la superficie caliente, es

¹⁵ Green Peace international; international SolarPACES; European Solar Thermal Electricity Association, "Global Concentrating Solar Power Outlook. Why renewable energy is hot," 2009.

decir, el receptor, ya que la pérdida de calor es directamente proporcional al área de la superficie caliente.

Con pérdidas de calor reducidas, los colectores de concentración pueden funcionar a temperaturas elevadas y aun así proporcionar cantidades significativas de energía térmica útil. Además, las superficies reflectantes son generalmente menos costosas que las de absorción y recepción. Por lo tanto, se pueden utilizar grandes áreas de superficie reflectante de bajo costo, concentrando la radiación solar incidente en pequeñas superficies de absorción. Sin embargo, para obtener altos rendimientos mediante la concentración de colectores, es preciso el uso de sistemas de seguimiento del movimiento del sol lo cual añade un costo significativo a la construcción de los sistemas de colectores¹⁶.

Hay dos grupos de sistemas de concentración solar de potencia (CSP). Mediante la Tabla 1.1 se muestran las diferencias de acuerdo a su nivel tecnológico y para el tipo de concentración de la radiación solar. Las diferentes tecnologías se describirán brevemente más adelante.

Nivel Tecnológico	Tipo de concentrador	Concentración del haz
Bajo	Fresnel	Enfoque lineal
	Concentradores parabólicos compuestos	Enfoque lineal
	Disco Stirling	Receptor enfoque puntual distribuido
Alto	Cilindro-Parabólico	Enfoque lineal
	Receptor central de torre	Receptor de enfoque puntual central

Tabla 1.1: Clasificación de los concentradores solares según su nivel tecnológico

¹⁶ William B., Geyer M., *Power from the sun.*: www.powerfromthesun.net, 2001.

El tamaño de las plantas de las tecnologías más avanzadas oscila entre 1 MW_e para las instalaciones del tipo Stirling, de 10 MW_e para los de torre central y 50 MW_e para los cilindro-parabólicos, aunque a día de hoy se pueden encontrar plantas de mucha mayor potencia. En general, los esfuerzos se focalizan hacia la construcción de plantas de mayor potencia, lo cual implica un mayor uso de la tierra y aumento de los costes.

Sobre este tema se pueden encontrar ejemplos que tratan de la posibilidad de reducción del tamaño de las CSP, uno sobre el suministro de energía de un edificio con una superficie de 65 m² con colectores cilindro-parabólicos¹⁷ y otro al suministro de energía en aldeas remotas aisladas, mediante una planta híbrida solar/fósil de algunas decenas de kW_e¹⁸.

En términos de densidad de potencia los proyectos, como, por ejemplo, Andasol en España tienen una huella promedio de alrededor de 12 m²/kW, mientras que las plantas SEGS entre 9,29 y 6,26 m²/kW¹⁹, notablemente superiores a los de los esquemas convencionales de generación de energía, es decir, 4 veces la huella de un generador de micro- turbina en el rango de 0,15-1,5 m²/kW (Aspen Systems Corporation, Applied Sciences Gestión Group, 2000). Para mejorar la densidad de potencia, en la actualidad, las áreas de investigación se dirigen al grado de la eficiencia óptica y térmica de los componentes solares, así como el uso de la generación directa de vapor (DSG) en los receptores^{20,21}.

1.3.1.- Tecnología CSP de Disco Parabólico “STIRLING”

Es un tipo de tecnología CSP cuyo principal componente son una serie de discos parabólicos de alta reflectividad y un receptor solar con unidades generadoras independientes (entre 5 y 25 kW eléctricos de potencia unitaria). Su funcionamiento consiste en el calentamiento de un fluido localizado en el receptor hasta una temperatura de alrededor de 750°C, posteriormente la energía térmica es transformada directamente en electricidad por el motor.

¹⁷ Ming Q., Hongxi Y., and David H. Archer, "A solar thermal cooling and heating system for a building: Experimental and model based performance analysis and design" Solar Energy N°84, pág.166–182, 2010.

¹⁸ Kane M., Larrain D., Favrat D., and Allani Y., "Small hybrid solar power system" Energy N°28, pág.1427–1443, 2003.

¹⁹ FLABEG Holding GmbH. (2008) Track Record Solar Mirrors 1983–2010. <http://www.flabeg.com>

²⁰ Eck M., Zarza E., Eickhoff M., Rheinlander J., and Valenzuela L., "Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs" Solar Energy N°74, pág.341-351, 2003.

²¹ Eck M. and Zarza E., "Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs" Solar Energy N°80, pág.1424–1433, 2006.

Se aprecian algunas similitudes, en cuanto a la generación de energía eléctrica, con las placas fotovoltaicas desde el punto de vista de explotación de la planta debido a la pequeña complejidad de la operación por el hecho de ser factible y fiable la automatización completa, especialmente los equipos de orientación y los de transformación de la radiación solar en energía mecánica de rotación requiriendo muy poca intervención por parte de los operarios. En realidad, se trata de un motor termodinámico que actúa en ciclos de calor tratándose de un proceso exotérmico (de combustión externa) cuyo funcionamiento es debido al aporte de calor sea cual sea su procedencia^{22,23}.

Los elementos principales que componen el sistema son:

- El **concentrador** con curvatura parabólica y baja relación Distancia focal/Diámetro ($f/D = 0,6$) con el que se consiguen temperaturas cercanas a los 800°C. La superficie cóncava del concentrador está compuesta de espejos de vidrio, en una segunda superficie, cada uno con su correspondiente curvatura parabólica o solamente una superficie compuesta por espejos delgados soportados sobre una estructura de fibra de vidrio.
- El **receptor**, compuesto por una cavidad con una pequeña apertura y un aislamiento.



Figura 1.4: Concentrador solar parabólico con motor Stirling.

Fuente: <http://www.energias-renovables.com/articulo/endesa-quiere-lanzar-el-disco-stirling>

²² Álvarez Flores J.A., Callejón Agramunt I., Forns Farrús S. “*Maquinas térmicas motoras-1*” 1ª Edición; Universidad Politécnica de Cataluña, pág.391-436, 2002.

²³ Kongtragool B. and Wongwiset S., “A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°7(2), pág.131-154, 2003.

El funcionamiento del motor Stirling se basa en el calentamiento o enfriamiento de diferentes componentes como pueden ser aire, hidrógeno, helio y actualmente con sales fundidas, mediante la incidencia de la radiación solar aprovechando los ejes rotatorios adaptados al sistema obteniéndose un incremento de volumen y aprovechando dicho movimiento para el desplazamiento de una parte del motor (Figura 1.5). El siguiente paso consiste en el enfriamiento del compuesto lo que conlleva una reducción de volumen dándose el movimiento de retorno del motor a la posición inicial y obteniéndose de esta manera energía mecánica²⁴.

En el receptor se vaporiza un metal líquido (generalmente sodio) que posteriormente condensa en la superficie de los tubos por los que circula el gas de trabajo y refluye nuevamente al absorbedor.

Este equipo permite una eficiente conversión de energía solar radiante en energía eléctrica utilizando un alternador como elemento intermedio, aunque algunos autores proponen otros sistemas intermedios con la finalidad de incrementar el rendimiento del sistema²⁵.

La eficiencia de la técnica de Disco Stirling se ha llegado a situar en un 30% como valor máximo y alrededor de un 25% de promedio diario en unidades generadoras de entre 7 y 25 kW.

²⁴ Taggart S., “CSP: dish projects inch forward”. Renewable Energy Focus, N°9(4), pág.52-54, 2008.

²⁵ Wu S.Y., Xiao L., Cao Y., R, Li Y.R., “A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation”. Applied Energy. N°87(2), pág.452-462, 2010.

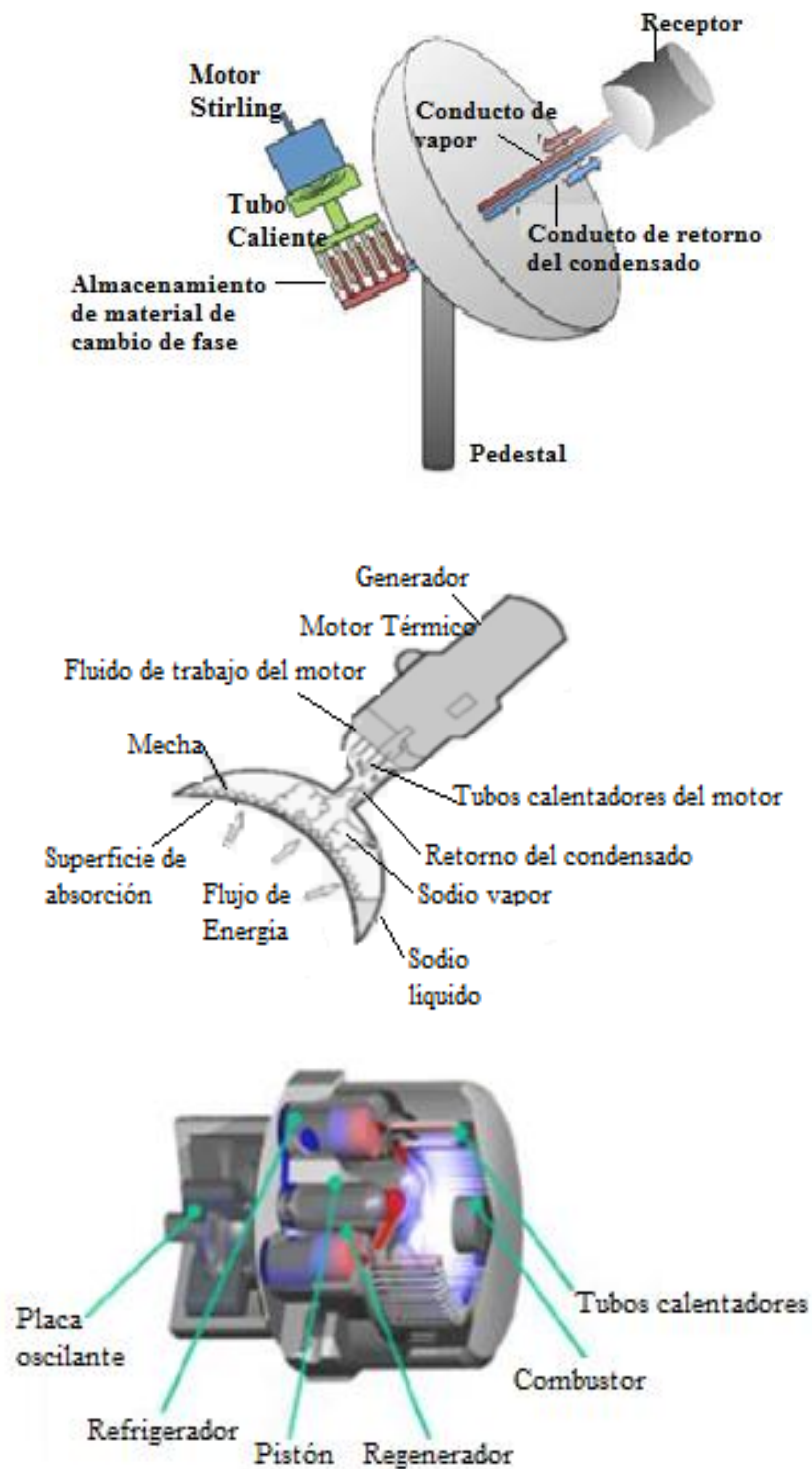


Figura 1.5: Funcionamiento tecnología de Disco Stirling y tubo receptor de absorción.

Fuente: <https://themorningstarg2.wordpress.com/tag/motor-stirling/>

Durante el proceso de captación de la radiación solar mediante esta técnica (de motor Stirling) no existe combustión y por tanto la contaminación es inexistente; la inclusión de sales fundidas en esta técnica ha sido uno de los principales avances en los

últimos años como por ejemplo el empleo de sodio como fluido captador de la radiación solar, el cual se distribuye por toda la superficie receptora del flujo de energía absorbiendo la radiación entrante con evaporación y desplazamiento hasta el intercambiador de calor donde cede gran parte de la energía contenida en el gas del motor que se condensa y retorna acumulándose en el recipiente que alberga el sodio y redistribuyéndose a la superficie receptora por el fenómeno de capilaridad²⁶.

Este tipo de receptor se ha de encontrar aislado del exterior para evitar la presencia de oxígeno en el sistema y evitar el fenómeno de corrosión ya que la presencia del mismo, genera la aparición de óxidos ocasionando una considerable disminución del rendimiento del sistema.

Ventajas

- Altos rendimientos inmediatos, de solar a eléctrica, entorno al 30%)
- Modularidad.
- Capacidad de hibridación.
- Experiencia operacional.

Desventajas

- Los sistemas híbridos tienen una eficiencia de combustión baja y su fiabilidad está aún por demostrar.

1.3.2.- Tecnología CSP “FRESNEL”

Esta tecnología se utiliza para la obtención de energía eléctrica y, algunas veces, energía térmica. Las plantas que se han desarrollado mediante este sistema son principalmente plantas piloto de hasta 6 MW, aunque hay algunas en desarrollo de hasta 150 MW.

Este tipo de sistemas se aproximan a la forma parabólica de los sistemas cilíndrico-parabólicos, pero utilizando largas filas de espejos planos, o levemente curvos, para reflejar los rayos solares en un receptor lineal fijo.

²⁶Adkins D.R., C.E.A., Bradshaw R.W., Goods S.H., “*Mass Transport, Corrosion, Plugging, and Their Reduction in Solar Dish Stirling Heat Pipe Receivers*”. Sandia National Laboratories, 1996.

Su funcionamiento está basado en el calentamiento de un fluido mediante espejos reflectores planos simulando un espejo curvo por variación del ángulo ajustable de cada fila individual de espejos, en relación con el absorbedor de tal manera que concentran la radiación solar a lo largo de una línea donde se sitúa el receptor por el que discurre un fluido, que se calienta a temperaturas de hasta 450°C y que se dispone fijo al terreno sin la posibilidad de giro solidario de los espejos, que enfocan la energía irradiada por el sol en el tubo absorbedor, colocado 8 metros por encima de ellos según se muestra en la Figura 1.6.

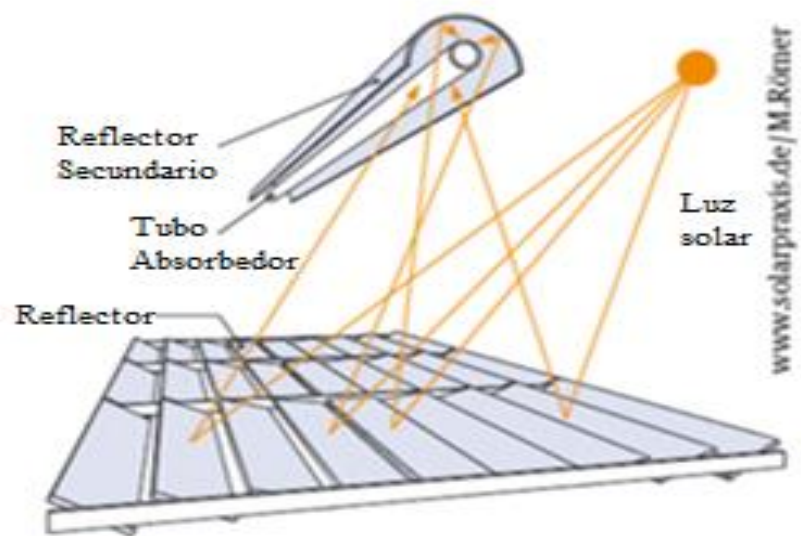


Figura 1.6: Funcionamiento Central termosolar con tecnología Fresnel de Areva Solar

Fuente: <http://www.protermosolar.com/boletines/43/n19.html>

Las características principales son:

- Los espejos reflejan la luz sobre una línea focal y están formando una superficie plana o siguen ligeramente una curvatura parabólica a nivel del suelo así se reducen los efectos del viento y facilita su mantenimiento.
- Sistema modular replicable siendo los reflectores espejos de vidrio, componentes muy baratos.
- Generan directamente vapor y no se requieren intercambiadores de calor con emisión cero de CO₂ y poca necesidad de refrigeración de agua (refrigeración mediante aire).

En cuanto a las ventajas y desventajas que presentan este tipo de instalaciones podemos destacar las siguientes:

Ventajas

- Facilidad de fabricación y bajo coste.
- Mayor robustez y menor mantenimiento.
- Sistema de seguimiento sencillo.
- Uso eficiente del terreno.
- Generación de vapor Directa.

Desventajas

- Temperaturas de operación más bajas que los cilindro-parabólicos (hasta 300°C).
- Tecnología poco consolidada comercialmente.

Este tipo de tecnología CSP se encuentra poco desarrollada y con muchas posibilidades de mejora. Su mayor ventaja es el diseño relativamente simple de los espejos, lo que puede implicar costos más bajos. Es uno de los conceptos más recientes aparecidos y por ello no ha alcanzado su total desarrollo, aunque es posible encontrar aplicaciones de uso comercial. Aparece como una alternativa para obtención de energía de forma eficiente en ciudades con elevada incidencia de la radiación solar. Debido al escaso desarrollo tecnológico no ha sido posible obtener mejores rendimientos en el

aprovechamiento de la energía, lo que impacta en el aumento en los costos por generación de electricidad.

Recientemente se ha diseñado un sistema conocido como Compact Lineal Fresnel Reflectors (CLFRs), que utiliza dos receptores paralelos por cada fila de espejos lo que lo hace requerir menos superficie que los cilindros parabólicos para producir una cierta cantidad de energía y se han llevado a cabo diversas experiencias con sales binarias, 60% NaNO_3 + 40% KNO_3 para este tipo de centrales operando en el colector central donde se concentra la radiación solar obteniendo un apreciable rendimiento de la central²⁷.

1.3.3.- Tecnología CSP Cilindro-Parabólica

Comenzó su desarrollo en los años 80 y en la actualidad este tipo de plantas se encuentran distribuidas en diversos países con una potencia que oscila entre los 50 y 200 MW. Es la tecnología de concentración solar de potencia más desarrollada y de probado rendimiento^{28,29}.

Los concentradores solares son de la forma Cilindro-Parabólica que recogen la radiación solar de forma directa y la concentran en un foco alineado con el concentrador. Como consecuencia de la forma del concentrador, el foco está en el rango de 30 a 100 veces la intensidad normal y su funcionamiento consiste en la orientación con una apertura perpendicular a los planos de incidencia de los rayos solares (Figura 1.7). Para ello persigue la trayectoria solar mediante un dispositivo de un solo eje de manera que al estar continuamente enfocado, ocurre una transferencia de radiación solar a energía térmica al fluido (normalmente un aceite térmico) que circula por el interior del tubo absorbedor que luego es transferida mediante bombeo al bloque de potencia³⁰ en el cual existen una serie de intercambiadores de calor para producir vapor sobrecalentado y el calor presente en este vapor, se convierte en energía eléctrica en una turbina de vapor convencional.

²⁷ Grena R. and Tarquini P., “Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid Energy”. N°36(2), pág.1048-1056, 2011.

²⁸ Taggart S., “Parabolic troughs: “CSP's quiet achiever. Renewable Energy Focus”, N°9(2), pág.46-50, 2008.

²⁹ Fernandez G.A., Zarza E., Valenzuela L., Pérez E., “Parabolic-trough solar collectors and their applications”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. N°14(7), pág.1695-1721. 2010.

³⁰ Rolim M.M., Fraidenraich N. and Tiba C., “Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors”. Solar Energy, N°83(1), pág.126-133, 2009.



Figura 1.7: Detalle colector cilindro parabólico.

Fuente: <https://experiment.com/projects/>, Milwaukee School of Engineering

En este tipo de centrales termosolares, la concentración de la radiación solar es lineal, de más fácil instalación, pero de concentración de radiación solar menor y es por ello que las temperaturas alcanzadas no sean tan elevadas como en el caso de las centrales con concentración puntual.

Dependiendo del tipo de fluido de transferencia utilizado, la temperatura de operación de la central se moverá en un rango determinado lo que marcará el rendimiento máximo que se puede obtener en el ciclo de potencia. Con la aparición de nuevos compuestos que permiten ampliar el rango de temperaturas de trabajo, el intervalo ideal de este para los colectores cilindro-parabólicos es de 150-400°C. A temperaturas superiores se incrementan las pérdidas térmicas con la reducción del rendimiento y si son inferiores a 150°C entrarían en competencia con otro tipo de colectores más baratos como son los de tubo de vacío.

Este tipo de plantas han desarrollado una serie de mejoras relevantes a nivel de costes y rendimientos. En la actualidad hay 300 MW_s en operación, 400 en construcción y alrededor de 6 GW_s en promoción a nivel mundial.

Ventajas y desventajas en este tipo de centrales:

Ventajas:

- Disponibilidad comercial.
- Rendimiento máximo solar/electricidad alrededor del 21%.
- Capacidad de hibridación y almacenamiento.

Desventajas:

- Dadas las limitaciones térmicas del aceite térmico empleado, se obtienen temperaturas de operación moderadas (hasta 400°C).

1.4.- Tecnología CSP de receptor central de torre

Se trata de otra de las técnicas de aprovechamiento de la concentración de la radiación solar en media y alta temperatura.

Su funcionamiento consiste en la concentración de la radiación solar en la zona superior de una torre fija, permitiendo mayores temperaturas y eficiencias que los sistemas lineales. Mediante estos sistemas se puede generar vapor saturado o sobresaturado directamente o utilizar sales fundidas, aire u otro fluido. Actualmente, las extensiones de terreno para estos campos solares de heliostatos que componen una CSP de este tipo son una alternativa de menor costo para el diseño de campos, a pesar de la complejidad adicional asociada al sistema de seguimiento de espejos y los sistemas de emergencia para los posibles cambios de temperatura del receptor. El mantenimiento del sistema puede producir residuos menores o cambios en condiciones naturales de escurrimientos de agua.

La concentración de la radiación solar para esta técnica es del tipo puntual pudiéndose alcanzar temperaturas superiores a la concentración lineal utilizada en otras técnicas. La aplicación más común de este tipo de centrales es, como en los casos anteriores, la generación de energía eléctrica.



Figura 1.8: Fotografía aérea de la Central Solar de tecnología de Torre Central Gemasolar, Andalucía (España)

Fuente: <http://quenergia.com/energias-renovables/construida-la-primera-planta-solar-que-functiona-de-noche-en-espana>

Las partes principales que componen el sistema son los heliostatos o espejos, la torre de concentración, el sistema de conversión de energía térmica en eléctrica (sistema de conversión de potencia), el sistema de enfriamiento y el fluido de trabajo, con la posibilidad de la inclusión de un sistema de almacenamiento térmico y un sistema de combustible fósil. Más adelante se detallarán los más implicados en el estudio realizado.

Un aspecto importante a tener en cuenta es el factor de planta, se define como el grado de utilización de la capacidad de una central eléctrica, resultado de dividir la energía producida entre la máxima teórica posible en un lapso de tiempo proyectándose en un porcentaje cercano al 60% para casos de almacenamiento térmico, y entre 35 a 38% sin almacenamiento, mientras la eficiencia en la conversión en la actualidad se encuentra del orden de 20 a 35%³¹. Las torres que alimentan con aire a turbinas a gas en una planta de ciclo combinado pueden ofrecer eficiencias del orden del 35%.

Desde el punto de vista técnico se ha podido comprobar la eficacia de este tipo de centrales utilizando diferentes formas de transferencia térmica, ya sea mediante aire,

³¹ International Energy Agency 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15, France IEA, Technology Roadmap Concentrating Solar, PowerTech. Roadmap, 2010.

vapor o sales fundidas con diferentes tipos de heliostatos^{32,33,34,35}.

El fluido térmico o caloportador puede ser utilizado directamente si se trata de agua convertida en vapor, puede emplearse para la generación de vapor, en el caso de que sean sales inorgánicas, o utilizarse para aumentar el rendimiento de una turbina de gas mediante el calentamiento del aire de admisión a la entrada de la cámara de combustión.

La radiación solar se puede suplementar con el aporte de un combustible fósil o renovable dando lugar a lo que se conoce como centrales híbridas cuyo aporte de combustible auxiliar es variable dependiendo del tipo de almacenamiento térmico utilizado en la central para minimizar los períodos transitorios de ausencia de radiación solar.

En general, las ventajas y desventajas de este tipo de plantas se pueden resumir como:

Ventajas

- Posibilidad de almacenamiento térmico.
- Relativas altas eficiencias.
- Facilidad de integración con ciclos Rankine muy conocidos.

Desventajas

- Necesidad de inversiones elevadas, mayores que para otras tecnologías.
- Poca densidad superficial de heliostatos.

Actualmente, existen diferentes diseños de estas plantas, en particular para el fluido de transferencia de calor, conservación de éste y ciclos termodinámicos. La evolución en el desarrollo de estas plantas indica que los diferentes diseños están siendo propuestos considerando una o varias torres con nuevos tipos de receptores, así como

³² Segal A. and Epstein M., “Comparative performances of tower-to' and tower- reflector, central solar receivers”. Solar Energy, N°65(4), pág.207-226, 1999.

³³ Codd D.S., Carlson A., Rees J., Slocum A.H., “A low cost high flux solar simulator”. Solar Energy. N°84(12), pág.2202-2212, 2010.

³⁴ Ávila Marín A.L., “Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System Technology: A review”. Solar Energy. N°85(5), pág.891-910, 2011.

³⁵ SENER and Torresol Energy win U.S. CSP Today awards. Renewable Energy Focus. N°12(4), pág.12. 2011.

diversas opciones de fluidos caloportadores y sistemas de almacenamiento ya que las elevadas temperaturas que se pueden alcanzar con esta tecnología (superiores a 1000°C) permiten generar elevados rendimientos de generación de energía eléctrica, incluso por encima del 25% en la transformación de radiación solar.

En este momento, la tecnología aún no ha alcanzado un desarrollo tal que permita obtener mayores rendimientos en el aprovechamiento de la energía, lo que impacta en el aumento de los costos por generación de energía eléctrica.

1.4.1.- Tecnología de receptor de torre “Beam Down”

El concepto "Beam Down" en la tecnología de los sistemas de receptor central fue propuesto inicialmente por el Instituto Weizmann de Israel.

A principios del año 2010 y como alternativa a la tecnología de receptor de torre central, la empresa MASDAR dedicada a la investigación y desarrollo de centrales termosolares impulsó la tecnología “Beam Down” que invierte el modo de funcionamiento de los sistemas de receptor de torre convencionales, en los que los heliostatos dirigen la radiación solar incidente en ellos, en el receptor/concentrador situado en la parte superior de la torre calentando el fluido transmisor del calor para la posterior generación de vapor.

Actualmente, se considera, como una de las maneras más prometedoras para la recepción de la energía solar. La principal ventaja de estos sistemas es que, en lugar de convertir la energía solar en calor en la parte superior de la torre, un reflector en forma hiperboloide, lo dirige verticalmente hacia abajo. En la parte inferior, se encuentra un concentrador parabólico compuesto que concentra aún más el haz antes de que sea capturado por el receptor. De esta manera se reducen de una forma importante las pérdidas de calor asociados con su transporte desde la unidad receptora al convertidor de energía debido a la posición del receptor.

El empleo de heliostatos de pequeño tamaño en comparación con heliostatos de gran tamaño en un sistema “Beam Down” permite el uso de una superficie hiperboloide

de menor excentricidad y, por lo tanto, menor tamaño y alcanzar así factores de concentración superiores³⁶.

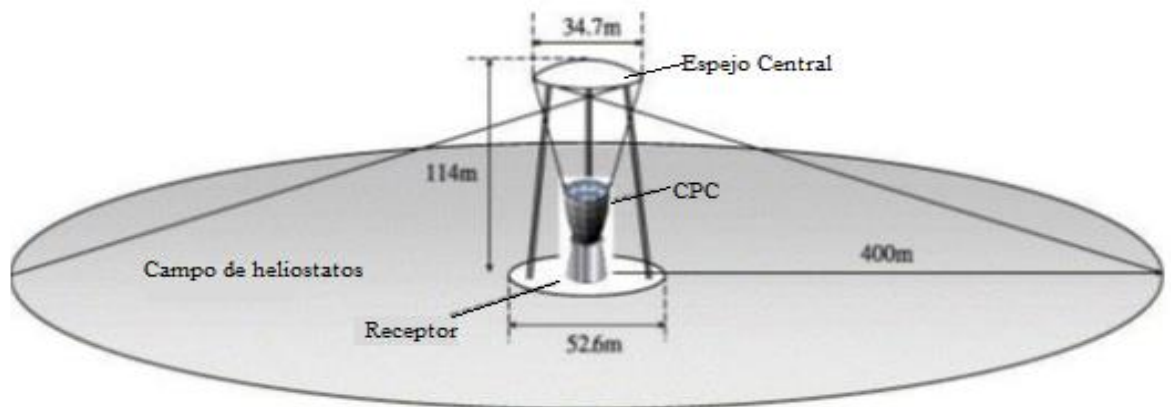


Figura 1.9: Ilustración de un sistema de concentración “Beam Down”
Fuente: Hasuike et al., 2006

Entre las ventajas y desventajas de esta variante se encuentran las siguientes:

Ventajas:

- El receptor se encuentra a nivel de tierra.
- Elevados rendimientos térmicos.
- Gradientes de temperatura altos.
- Posibilidad de almacenamiento en generación de Hidrógeno, sales fundidas, etc.
- Planta gestionable.

Desventajas:

- Alta dificultad óptica, mantenimiento y correcto funcionamiento del reflector central.
- Pérdida de radiación solar por doble reflexión.

1.4.2.- Funcionamiento de un receptor de torre

El receptor es el encargado de captar la radiación solar emitida desde los heliostatos y convertirla en energía térmica con el fin de alcanzar temperaturas elevadas (700°C-1100°C) y una caída de presión lo más pequeña posible para el calentamiento del fluido caloportador circulante. Debido a estas altas temperaturas, acordes al rendimiento

³⁶ Leonardi E., “Detailed analysis of the solar power collected in a beam-down central receiver system”, Solar Energy, 2012.

del ciclo termodinámico, los esfuerzos, en cuanto al desarrollo de los receptores va dirigido a la selección de materiales y su distribución para evitar las posibles pérdidas de calor y conseguir un aumento en el rendimiento en el ciclo global del proceso. Su funcionamiento es tan simple como el de un intercambiador de calor y consta, principalmente, de una serie de tubos de acero inoxidable con un recubrimiento exterior que favorece la absorción de la energía radiante procedente de los heliostatos y por los que circula el fluido de transferencia que será el responsable de la absorción. Por este motivo, se han diseñado los conocidos como receptores volumétricos que pueden ser presurizados o atmosféricos y que dependerá, principalmente, del tipo de fluido de transferencia térmica y la potencia necesaria.

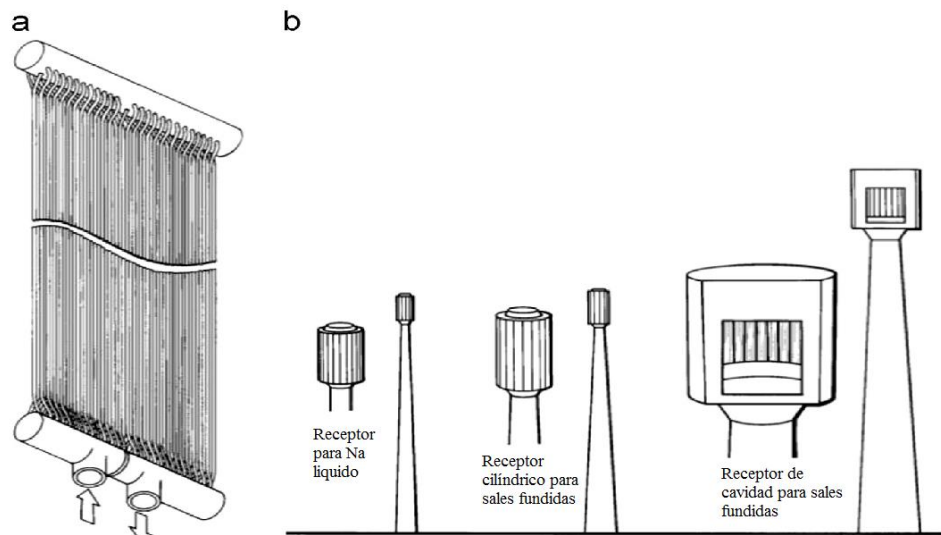


Figura 1.10: (a)Detalle del panel de tubos de un receptor, (b)Diferentes receptores de acuerdo al fluido de transferencia utilizado.

Fuente: Falcone PK. A handbook for solar central receiver design, SAND86-8009. Livermore, CA: Sandia National Laboratories; 1986

Pero no toda la energía procedente del campo de heliostatos y dirigida hacia el receptor es absorbida por el fluido caloportador, se producen pérdidas de energía debidas a la convección, radiación, conducción y otro tipo de pérdidas conocidas como “*spillage*”, que se trata de la radiación solar procedente de los heliostatos y dirigida hacia al receptor pero que no incide sobre la superficie absorbente. Las pérdidas debidas a la convección son debidas al viento y su velocidad y junto con las pérdidas por radiación, dependen del tamaño del receptor, temperatura de funcionamiento y diseño del receptor. A temperaturas elevadas, las más significativas son las pérdidas por radiación y las pérdidas por “*spillage*” se pueden minimizar aumentando el tamaño del receptor, aunque esto

aumentará las pérdidas por radiación y convección.

Para aumentar la absorbancia del receptor se utilizan unas pinturas especiales que facilitan el paso de la radiación y el revestimiento originado con estas pinturas permite conseguir una capacidad de absorción de 0.95³⁷.

Las pérdidas por conducción son atribuidas, principalmente, al soporte del receptor también conocido como torre, aunque se trata de unas pérdidas mínimas y pueden minimizarse reduciendo el tamaño y número de puntos de fijación del receptor y el empleo de materiales con baja conductividad térmica como pueden ser los aceros inoxidables.

1.4.3.- Tipos de receptores de torre

De forma general, los receptores de torre se dividen en dos grupos; receptores de cavidad y receptores externos.

- *Receptores de cavidad*: Los receptores de cavidad se encuentran protegidos del medio en todas las direcciones excepto la del campo de heliostatos y se corresponde con una ventana rectangular o circular situada en lo alto de la torre. El sentido de estos receptores es el de reducir las pérdidas de calor por convección y radiación. El ángulo de recepción de la radiación solar es inferior a 180° aunque existen algunas configuraciones, de cuatro receptores de cavidad, capaces de recibir la radiación los 360°³⁸. La mayoría de las configuraciones para este tipo de receptores es con uno asociado solamente con un campo norte.

- *Receptores externos*: Los receptores externos son susceptibles de recibir la radiación solar procedente de los heliostatos por todo su entorno, 360°, lo cual permite recibir la radiación solar, incluso, de campos de heliostatos próximos como sucede en plantas como “Gemasolar” o “Solar One”.

El problema asociado a este tipo de receptores es que, al encontrarse totalmente abiertos a la atmósfera, sufren enfriamiento debido al viento y pérdidas térmicas por

³⁷ Ho C.K., Mahoney A.R., Ambrosini A., Bencomo M., Hall A. & Lambert T.N. “Characterization of Pyromark 2500 patent international for high-temperature solar receivers” Transactions of the ASME, N°136: 014502-1 – 014502-4. 2013.

³⁸ Battleson K.W., “Solar power tower design guide: solar thermal central receiver power systems, a source of electricity and/or process heat. Annals of Nuclear Energy”, 1981.

radiación, con el entorno.

Teniendo en cuenta la forma de los receptores podemos encontrar que pueden ser planos o cilíndricos.

Los receptores de forma plana cuentan con la ventaja de la inclinación, a diferentes grados, hacia el campo de heliostatos con el objeto de mejorar la captura de la radiación solar reflejada por ellos como por ejemplo en la planta termosolar CESA1.

Los receptores de forma cilíndrica pueden ser externos o internos con la forma de cavidad, como puede ser el caso de la central PS10 ubicada en Andalucía, España.

Seguidamente se describen los diferentes receptores de uso más extendido:

- Receptor volumétrico de aire, abierto: Mediante este tipo de receptor, el aire es aspirado mediante un absorbedor compuesto por alambre de acero o material cerámico que, previamente, se ha calentado mediante la radiación solar a unas temperaturas cercanas a los 800°C. Dada la capacidad de absorción del receptor, las pérdidas térmicas son bajas pues el área superficial externa del absorbedor es menor que el área de transferencia hacia el material poroso que lo compone y es lo que se conoce como efecto volumétrico. Entre las ventajas más destacadas de este tipo de receptores se encuentran las siguientes:

- Su estructura presenta gran simplicidad.
- Baja inercia térmica.
- Alta temperatura del aire a su salida.

La desventaja con respecto a otros receptores es su baja capacidad de transferencia debido al bajo calor específico del aire lo cual lleva a una elevada velocidad de flujo y el nulo almacenamiento de aire caliente que permita un incremento en la eficiencia energética.

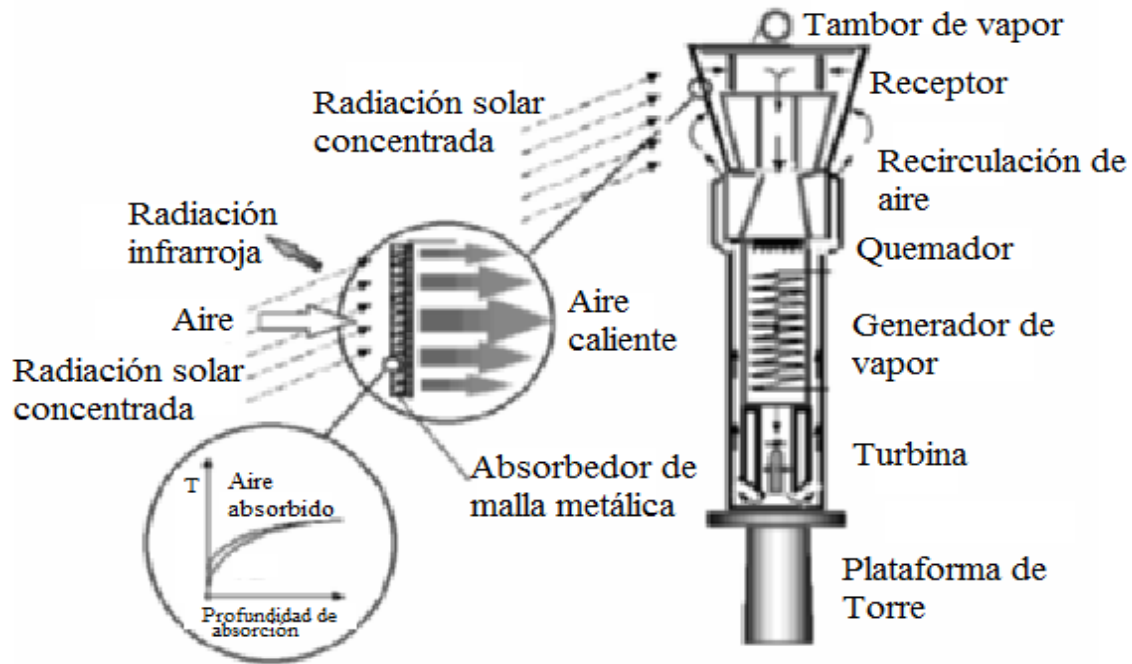


Figura 1.11: Esquema funcional de un receptor volumétrico de aire³⁹ Phoebus

El receptor mostrado mediante la Figura 1.11 se corresponde al tipo Phoebus con forma de pirámide hexagonal invertida de manera que las caras presentan la inclinación necesaria para la recepción de la radiación solar procedente del campo de heliostatos. El material que compone el absorbedor es de alambre de acero y en cuanto al medio de trabajo, el aire, hay que decir que presenta infinidad de ventajas como son su disponibilidad, atoxicidad, fácilmente manipulable y muy bajo o nulo poder corrosivo sobre los materiales, pero su gran desventaja es su bajo calor específico y es por ello que se requieren grandes volúmenes de flujo y medio de almacenamiento por separado.

- Receptor para sales fundidas: Los receptores de tubos son, actualmente, los sistemas más difundidos para el uso de sales fundidas. Se encuentra ubicado en la parte superior de la torre y consta de múltiples caras con paneles que albergan tubos de acero inoxidable y es donde se efectúa la transferencia de calor. En cada cara hay una entrada, una salida y uno o más paneles de tubos y en cada panel de tubos existe un colector de entrada y otro de salida. La sal fundida, es bombeada a través de los tubos por los que circula y aumenta su temperatura siendo transferida al depósito de sales calientes (565°C) o, directamente, al bloque de potencia para la generación de energía eléctrica.

³⁹ Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A., “Renewable Energy-Technology, Economics and Environment”. ISBN 978-3-540-70949-7. 2007.

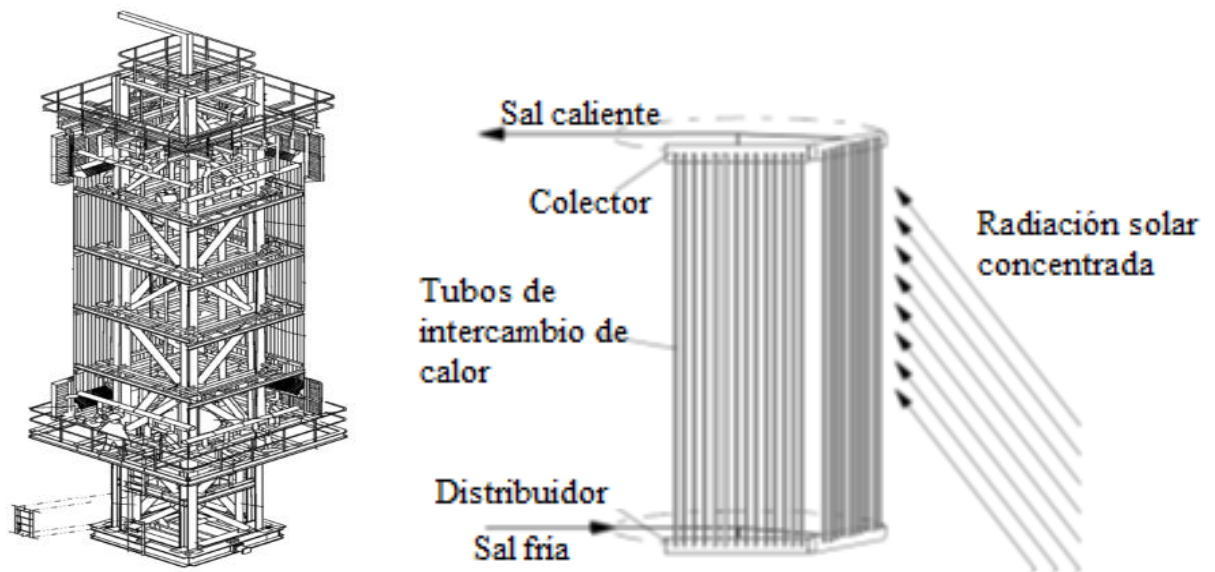


Figura 1.12: Detalle de receptor modular de múltiples caras y composición de las caras⁴⁰.

Fuente: David T. Wasyluk (Mogadore, OH, US) David L. Kraft (Massillon, OH, US) David L. Kraft (Massillon, OH, US) Jason M. Marshall (Wadsworth, OH, US) Ruth E. Irwin (Jeannette, PA, US) Steven P. Iannacchione (Jeannette, PA, US) *patente de receptor solar de flujo de serpentín vertical de sales fundidas*

El receptor más utilizado en este tipo de centrales termosolares es cilíndrico formado por una serie de bloques o paneles de tubos verticales, como se puede apreciar en la figura inferior, Figura 1.12. Cada uno de estos paneles está constituido por varios tubos con un cabezal de entrada, boquillas y colector de entrada y salida. Los tubos se encuentran apoyados, en la parte superior y dirigidos longitudinalmente hacia abajo, de tal forma que se permite la expansión térmica hacia la parte inferior⁴¹. La pérdida de calor en la parte trasera de los tubos se evita mediante la incorporación de una pared refractaria con aislamiento térmico de lana mineral.

Las dimensiones de un receptor vienen dadas por su diámetro y la altura. Como ejemplo se puede citar la planta termosolar PS10 en la localidad de Sanlúcar la Mayor de Andalucía, España, con un receptor cilíndrico de 4 paneles de tubos que conforman un diámetro de 14,83 metros y 12 metros de altura⁴².

⁴⁰ Kaltschmitt M., Streicher M., Wiese A. “Renewable Energy - Technology, Economics and Environment”. ISBN 978-3-540-70949-7. 2007.

⁴¹ Falcone PK. “A handbook for solar central receiver design. Sandia National Laboratories”, Livermore, SAND 86-8809. 1986.

⁴² Fernandez V. “PS10: A 11 MW_e Solar Tower Power Plant with Saturated Steam Receiver”. 2006.

Los materiales que componen los tubos de los paneles han de ser capaces de soportar elevadas temperaturas y evitar en mayor medida el fenómeno de corrosión provocado por el uso de sales fundidas. El material seleccionado para este estudio ha sido el acero INCONEL 617, y las dimensiones más comunes de los tubos que conforman los paneles son, de forma general, de diámetro 60 mm. y espesor cercano a los 1.7 mm. Otro tipo de acero empleado para estos tubos ha sido el austenítico 316 en el que se ha observado un mínimo fenómeno de corrosión con la presencia de finísimas capas de óxido inferiores a 10 micras⁴³.

En las centrales termosolares de receptor central de torre que operan con la tecnología de sales fundidas, el receptor es una parte crucial que puede llegar a representar entre el 15% y el 20% de la inversión de la planta⁴⁴ y se encuentran sometidos a una serie de ciclos térmicos que provocan una reducción del tiempo en servicio del mismo.

El desarrollo de los receptores utilizados para sales fundidas fue iniciado por las empresas norteamericanas Boeing y Bechtel consiguiendo unos excelentes resultados en la planta “*Solar Two*” de 10 MW_e en California en el año 1996 y actualmente existe una alternativa a este tipo de receptor que es el receptor de capa o película de sal configurado mediante delgadas películas de sal sobre placas de acero inoxidable que son calentadas por la radiación solar incidente, es un tipo de receptor más barato.

La capacidad calorífica de la sal fundida es muy superior a la del aire y es por ello se puede utilizar directamente o como sistema de almacenamiento. Utilizando sal fundida como medio de transferencia se evita la aparición de flujo de dos fases ya que el medio de transferencia de calor, siempre existe en fase líquida.

- Receptor de agua / vapor: Este tipo de receptor posee una estructura similar al descrito anteriormente de sales fundidas con la diferencia que, por los tubos de los paneles, en lugar de sales fundidas, circula agua que se evapora directamente obteniendo vapor sobrecalentado que pasa directamente a la turbina para su posterior generación de energía eléctrica.

⁴³ Pacheco J.E. “*Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project*”. SAND2002-0120, 2002.

⁴⁴ Singer C, Buck R, Pitz Paal R, Müller Steinhagen H. “*Assessment of Solar Power Tower driven ultrasupercritical steam cycles applying tubular central receivers with varied heat transfer media*”. Journal of Solar Energy Engineering, N°132, pág.1-12, 2010.

En la década de los 80, se realizaron algunos proyectos con un receptor central de este tipo y surgieron numerosos problemas, la mayor parte de ellos provocados por los flujos de dos fases agua/vapor y las dificultades relacionadas con la transferencia de vapor y procesos de fatiga en los materiales.

Durante la última década se ha desarrollado la tecnología de este tipo de receptores y se ha incorporado un sistema de almacenamiento de vapor saturado mediante tanques que permiten la operatividad, limitada, de la planta durante cortos períodos de baja radiación solar.

1.4.4.- Componentes de la tecnología CSP de receptor central de torre

Como se comentó anteriormente, la tecnología CSP de receptor central de torre, es una de las más desarrolladas y rentables en la actualidad. Los principales componentes de este tipo de plantas termosolares han sido seleccionados de acuerdo a los materiales, principalmente aceros, y fluidos caloportadores necesarios para el funcionamiento de la planta. A continuación, se detallan los componentes y más tarde se entrarán a valorar las características de estos aceros y compuestos inorgánicos.

Campo Solar

El campo solar consta de un gran número de heliostatos que son espejos individuales soportados mediante una estructura de doble eje con movimiento ascendente/descendente e izquierda/derecha con un sistema analógico de seguimiento solar que controla el movimiento en un plano de simetría de los ejes. El plano de simetría (espejo) refleja la radiación solar hacia un objetivo fijo (receptor) durante el día, posición que se recupera automáticamente al comienzo del siguiente día. El rastreo de las diferentes posiciones solares se realiza mediante un sistema electrónico altamente preciso.

El campo solar representa gran parte de la inversión realizada en la planta y es por ello el gasto en innovación de los heliostatos en cuanto a su calidad óptica, vida útil y superficie de ubicación de los mismos.

Tecnológicamente existen dos tipos de heliostatos, los llamados metal/cristal facetado y los de membrana⁴⁵:

- *Heliostatos de metal/cristal facetado*: Se componen de una serie de espejos cuadrados cada uno de ellos con un tamaño de 2-4 m² montados sobre un marco de acero, generalmente acero al carbono A572 Gr.50. Cada heliostato tiene una unidad de seguimiento solar individual. Las dimensiones son 12.08 metros de ancho y 10.06 metros de alto. El peso del conjunto supera las 7 Ton. Son los heliostatos habituales en este tipo de centrales termosolares⁴⁶.
- *Heliostatos de membrana*: Este tipo de heliostatos se producen con el fin de reducir su peso y por tanto el coste y son unas membranas metálicas o plástico montadas sobre un marco circular que la permite mantener tensionada. Los espejos son más delgados y se sitúan encima de la membrana consiguiéndose un mayor rendimiento en la reflexión solar. Se puede variar la presión en el interior del heliostato consiguiendo una deformación y permitiendo un ajuste de la longitud de enfoque. Este heliostato tiene un diámetro de 14 metros y una superficie de concentración de 150 m²; su peso supera las 8 Ton. y gracias a los mecanismos de accionamiento mejorados se consigue la reducción de costos.



Figura 1.13: Heliostatos de metal/cristal facetado y de Membrana

Fuente: Spiros Alexopoulos, Bernhard Hoffschmidt “*Concentrating Receiver Systems (Solar Power Tower)*”.

⁴⁵ Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A., “*Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*”, 2007.

⁴⁶ Mancini Thomas R., “*IEA-Solar Power and Chemical Energy Systems Task III: Solar Technology and Applications Catalog of Solar Heliostats*”, 2000.

Torre y Receptor

La función principal de la torre es la de soportar el receptor en su parte superior y si fuera necesario, albergar un acumulador intermedio para el fluido de transferencia. Otras tareas no menos importantes que desempeña la torre son el calibrado de los heliostatos y por otro proporcionar el soporte de las conducciones que transportan el fluido de transferencia térmica.

Por todo esto, la torre ha de garantizar el aislamiento de las tuberías para evitar las pérdidas de calor, por convección, con la atmósfera y por conducción, a través de su estructura. Otro aspecto importante son las dimensiones de la misma para que permita espacio suficiente a las tuberías y evitar las pérdidas de presión y que la bomba de impulsión se vea sometida a realizar un sobreesfuerzo.

En el diseño de la torre se ha de tener en cuenta la influencia de la fuerza del viento y su impacto en la precisión del enfoque de la radiación de los heliostatos, la sombra proyectada sobre el campo solar y el impacto paisajístico.

La estructura de la torre puede ser de entramado de acero o de hormigón armado. Las construidas con acero consiguen hacer algo menos sombra sobre el campo solar y ofrecen un mejor aislamiento a las conducciones. La altura de las torres de entramado de acero, se mantienen por debajo de los 120 metros de altura⁴⁷. Sin embargo, la mayoría de las instalaciones están construidas con hormigón armado, sobre todo aquellas que superan los 120 metros de altura. La forma de una torre de hormigón puede ser cilíndrica o paralelepípedica.

Las características del receptor de torre han sido explicadas en los apartados 1.4.2 y 1.4.3.

Conducciones principales de la planta

Como conducciones principales de la central termosolar nos vamos a referir a las tuberías que transportan el fluido de transferencia desde el receptor a los tanques de

⁴⁷ Kistler B., “A user’s manual for DELSOL3: A computer code for calculating the optical performance and optimal system design for solar thermal central receiver plants”. Technical report, Sandia National Laboratories, Livermore, CA (USA). 1986.

almacenamiento, de allí al intercambiador de vapor y de este al bloque de potencia y el retorno hasta el receptor.

El entramado de tuberías por el que circulan las sales fundidas incluye las válvulas y soportes como componentes principales del circuito de trabajo. El conjunto de tuberías por dónde circulan las sales frías (290°C), son las que alimentan el receptor de la torre y el tramo de descarga, mediante bomba desde el depósito de las sales frías (290°C) dónde se utiliza un colector de gran diámetro para ir disminuyendo el diámetro en los conductos posteriores e intercalando una serie de receptores a lo largo del recorrido del fluido caloportador.

La configuración que presenta el entramado de tuberías por el que circula la sal caliente (565°C) consta de una serie de conductos de recirculación que permiten el retorno a los tanques de almacenamiento térmico, sin válvulas de cierre. El aislamiento de los conductos evita la congelación de las sales de nitratos, sobre todo, en los tubos de los receptores. Para conseguir el aislamiento de estos conductos en determinadas zonas críticas se utiliza un aerogel que presenta una densidad aparente inferior a la de otros sólidos porosos tradicionales y la conductividad térmica es también menor que la de la fibra cerámica.

En el depósito de sales se incluye un cierre hermético que impide el reflujo de las sales fundidas hacia la torre.

Como se ha dicho anteriormente el entramado de tuberías se encuentra aislado térmicamente y los tipos de materiales empleados para el transporte de la sal fría (290°C) son aceros al carbono del tipo A572 o A516. Estas tuberías se encuentran calefactadas en determinados puntos del trazado para evitar la congelación de las sales y conseguir el precalentado de las tuberías vacías que se encuentren a temperatura ambiente.

Los materiales utilizados en las tuberías que transportan las sales fundidas calientes son aceros inoxidables del tipo AISI 316, AISI 347H y el utilizado para este estudio, la superaleación rica en Ni del tipo INCONEL 617 debido a las exigencias requeridas en los distintos procesos.

El sistema de tuberías está diseñado para poder ser drenado en largos períodos de inactividad de la planta.

La mayor parte de los daños sufridos por las conducciones de este tipo de plantas son debidos al fenómeno de corrosión provocado por el contacto de las sales fundidas a elevada temperatura con los diferentes aceros involucrados en el sistema.



Figura 1.14: Detalle de conductos de transferencia de sales fundidas.
Fuente: Sandia National Laboratories, Photo by Randy Montoya

Estos daños han sido evaluados, de forma precisa, en un informe elaborado por el centro de investigación *Sandia National Laboratories* para una central termosolar de receptor de torre operativa como es la Solar Two⁴⁸. Dicho informe se basa en los diferentes ensayos de corrosión de metales en contacto con sales fundidas.

En el empleo de aceros inoxidables del tipo 304 y 304H en las tuberías de transporte de sal fundida caliente se observó la aparición de agrietamiento debido a la corrosión bajo tensión.

En los conductos utilizados para el transporte de la sal fría (290°C) se utiliza un acero al carbono en el que los problemas detectados son de corrosión causada por el sobrecalentamiento de los tubos.

Un tipo de problema que se pueden plantear en los conductos son las fugas a través de las uniones o soldaduras debido a la frecuencia de los ciclos de trabajo por las contracciones y dilataciones que puede sufrir el material. Este problema, aunque frecuente, se soluciona con el reajuste de las bridas de empalme a las temperaturas de

⁴⁸ Moore R., Vernon M., Clifford K. Ho, Nathan P. Siegel and Gregory J. Kolb, “*Design Considerations for Concentrating Solar Power Tower Systems Employing Molten Salt*” Sandia National Laboratories, P.O. Box 5800 Albuquerque, NM. 2010.

trabajo⁴⁹. En la actualidad existen diferentes tipos de bridas mejoradas para su uso a altas temperaturas con juntas de asiento anti estrés las cuales mantienen una fuerza constante sobre el asiento compensando los efectos de rotación. Los materiales de estas juntas pueden ser poliméricos, metálicos e incluso amianto.

En lo referente a las bombas y válvulas se ha comprobado la poca información que existe hasta el momento tanto de materiales como tipos y fallos en operación. Se ha comprobado el uso de válvulas con fuelle de estanqueidad⁵⁰ para el uso de colectores solares en Italia y que permiten los ciclos térmicos de expansión y contracción elaboradas, generalmente, con fuelle en acero inoxidable 316Ti y cuerpo en acero al carbono. Por otro lado, la empresa de ingeniería Friatec-Rheinhütte ha desarrollado un tipo de bombas cuyos materiales empleados en su fabricación han demostrado su fiabilidad mediante ensayos con sales fundidas a elevada temperatura no siendo observado el fenómeno de corrosión, a corto plazo.

Bloque de Potencia

En este apartado se van a considerar como elementos principales del bloque de potencia la turbina de vapor y el intercambiador o generador de vapor.

Las centrales termosolares de receptor central de torre presentan diferencias, unas de otras, no solo por la forma de los heliostatos y la torre, sino también por la manera en que la radiación solar se convierte en energía eléctrica. Existen, principalmente, cuatro tipos de conversión mediante ciclos y de entre ellos dos a escala industrial y uno comercial, a saber:

- Ciclos mediante aire comprimido hasta 4,6 MW_e como por ejemplo Solar Up-scale Gas Turbine System de Solugas.
- Ciclos atmosféricos de hasta 1,5 MWe como por ejemplo Jülich DLR (2008). Der Solarturm Jülich. Technical report, Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt, Institut für Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln.
- Ciclos mediante sales fundidas de 17 MWe como la planta Gemasolar de Torresol Energy.

⁴⁹ Kelly B., “Lessons learned, Project history and operating experience of the Solar Two Project”. SAND2000-2598, 2000.

⁵⁰ Fabrizi F., “Experimental remarks on behaviour during operation and thermal fluid dynamics in transition states of molten salt mixtures”, NREL Denver West Business Park Golden, CO, USA. 2007.

- Ciclos directos de vapor de 36 MWe como la planta PS10 de Abengoa o Sierra Sun Tower de eSolar.

Los **ciclos de aire comprimido** presentan un ciclo primario en el que la compresión se consigue mediante el compresor del bloque de turbina, el aire comprimido se calienta hasta una temperatura próxima a los 900°C en depósitos herméticos⁵¹ y posteriormente se traslada a una cámara de combustión en la que se añade el combustible previo a la turbina que acciona el compresor y generador. Sucesivamente, los gases de escape se utilizan para conseguir un ciclo de vapor mediante un generador del mismo y obtener un incremento en el rendimiento de la totalidad del ciclo (ciclo combinado).

Mediante la revisión bibliográfica se comprueba la existencia de la mejora en los ciclos de presión como puede ser el llamado “Top Cycle” que consta de una turbina de gas, adicional, soportada sobre la turbina principal⁵².

Los **ciclos atmosféricos** se basan en un ciclo abierto en el que el aire presente en la atmósfera se extrae mediante un receptor volumétrico con una malla de alambre o espuma cerámica porosa⁵³ en dónde el aire se calienta hasta 900°C y se dirige, durante el proceso de carga, hacia un lecho de piedras para ser almacenado⁵⁴, o mediante un generador de vapor que produce un ciclo de vapor convencional, durante la descarga. Después, se insufla aire a la entrada del receptor y parte de él se introduce de nuevo en el ciclo. Se han propuesto algunos ciclos atmosféricos mejorados como un ciclo solar combinado con un intercambiador aire-aire para reemplazar la cámara de combustión⁵⁵.

Los **ciclos de sales fundidas** presentan un circuito primario en el que la sal fundida que se encuentra a 290°C es bombeada desde un tanque hacia el receptor de la

⁵¹ Ávila Marín A.L. “*Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review*”. Solar Energy, N°85(5), pág.891-910, 2011.

⁵² Strand T., Spelling J., Nilsson L. R. K., and Hansson H. “*An innovative hybrid solar gas-turbine power plant based on the topcycle concept*”. In submission to the proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on concentrating solar power and chemical energy systems, Marrakesh, Morocco. 2012.

⁵³ Hoffschmidt B., Téllez F.M., Valverde A., Fernandez J. and Fernandez V. “*Performance evaluation of the 200-kWth HiTRec-II Open volumetric air receiver*”. Journal of Solar Energy Engineering, N°125(1), pág.87, 2003.

⁵⁴ Singh H., Saini R., and Saini J. “*A review on packed bed solar energy storage systems*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°14(3), pág.1059/1069, 2010.

⁵⁵ Spelling J., Favrat D., Martin A. and Augsburg G. “*Thermoeconomic optimization of a combined-cycle solar tower power plant*”. Energy, N°41(1), pág.120-113. Stoddard, M. (1986). *Convective loss measurements at the 10 MWe Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant*. Technical report, Sandia National Laboratories, Livermore, CA (USA). 2011.

torre, a través de un conducto, dónde se calienta hasta 565°C y posteriormente se almacena en un tanque bajo la torre como muestra la Figura 1.15.

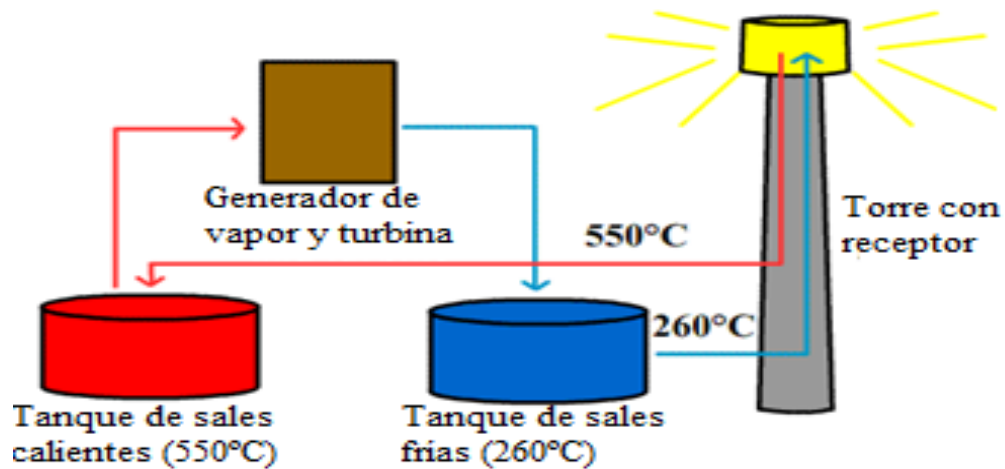


Figura 1.15: Esquema simple del funcionamiento de una CSP de receptor central de torre.

Fuente: Christopher Barile coursework for Physics 240, Stanford University, 2010

La sal caliente (565°C) se hace circular hacia un generador de vapor dónde se produce un ciclo de vapor convencional y retorna al tanque de almacenamiento de sales frías (290°C). Dada la enorme cantidad de sales fundidas, la capacidad de almacenamiento puede llegar a conseguir hasta 15 horas de tal manera que el funcionamiento de la central puede llegar hasta las 24 horas de un día claro en los meses de verano. A pesar de que, sin el aumento de escala, el potencial de la central se ve limitado, el desarrollo de nuevos compuestos en forma de sales novedosas con un rango de trabajo a temperaturas diferentes a las actuales, desde 100 hasta 700°C permitiendo la generación de vapor supercrítico^{56,57} y por tanto se abren grandes perspectivas en este campo.

Los **ciclos directos de vapor** no utilizan ningún bucle intermedio entre el receptor y la turbina de vapor de tal manera que el agua de alimentación se bombea directamente hacia los tubos del receptor y se evapora. El vapor generado, se mantiene saturado y se pasa a un depósito de inercia durante poco tiempo, de allí se impulsa hacia la turbina, se condensa y se bombea de nuevo hacia la torre.

⁵⁶ Ren N., Wu Y.t., and Ma C.F., "Experimental Study on Thermal Properties of New Kinds of Mixed Nitrate Salts". In submission to the proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, N°100, Marrakesh, Morocco. 2012.

⁵⁷ Raade J.W., Elkin B., and Vaughn J. "Novel 700°C molten salt for solar thermal power generation with supercritical steam turbines". In Submission to the Proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Vol.1, Marrakesh, Morocco. 2012.

La mejora de estos ciclos aparece en los ciclos directos de vapor sobrecalentado permitiendo el empleo de turbinas de mayor tamaño e incrementando el ciclo de eficiencia en hasta un 40%⁵⁸.

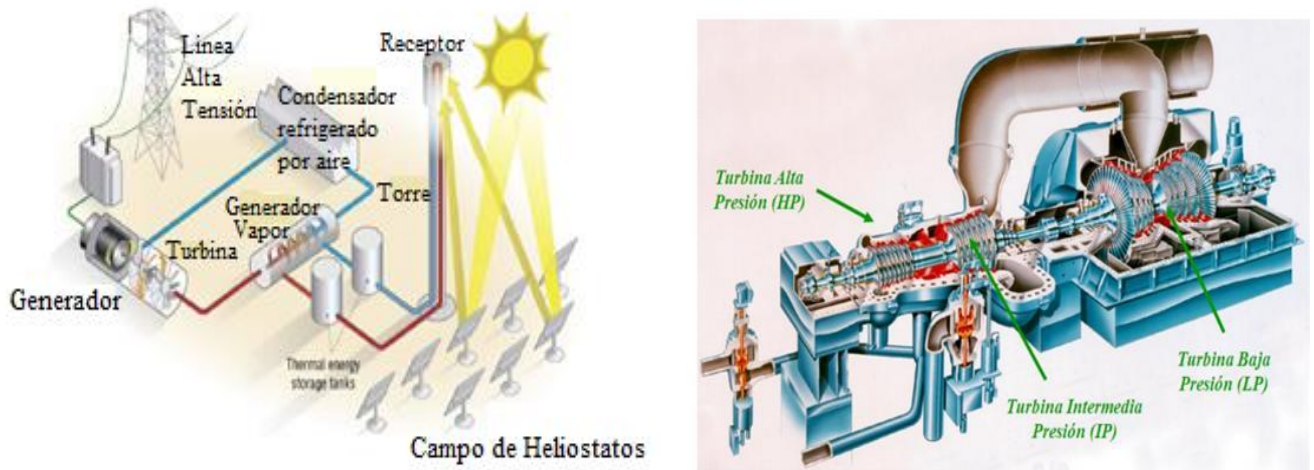


Figura 1.16: Detalle del bloque de potencia en una CSP de receptor central de torre y turbina de vapor de tres etapas

Fuente <http://decarboni.se/>

Los principales elementos a tener en cuenta de una turbina de vapor y con elevada dependencia de los materiales constitutivos son⁵⁹:

- **Álabes:** Son los elementos responsables de transformar la energía del vapor en un movimiento rotatorio en el eje de la turbina.

Materiales: Generalmente, se trata de aceros modificados con un 13% de Cr⁶⁰. Para condiciones de trabajo mediante vapor supercrítico y temperaturas cercanas a los 600°C se utilizan aceros más aleados del tipo 304 o 316⁶¹.

Defectos: Los principales son debidos a la erosión y corrosión en sus diferentes tipos⁶², que se evitan mediante endurecimiento superficial por tratamientos térmicos.

⁵⁸ Garmendia A.E., Gilaberte R.N., Jiménez J.B. and Méndez Marcos J.M. "Description of Abengoa solar tower solution with superheated steam technology". In submission to the proceedings of the SolarPACES Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Marrakesh, Morocco. 2012.

⁵⁹ Álvarez Flórez J. A. y Callejón Agramunt I. "Máquinas Térmicas Motoras", Barcelona. 2002.

⁶⁰ Nomoto H., Kuroki Y., Fukuda M. y Fujitsuka S. "Recent Development of Steam Turbines with High Steam Temperature", Proceedings of the International Conference on Power Engineering-05, April 5-7, 2005, Chicago, USA 2006.

Wang W.Z., Xuan F.Z., Zhu K.L. y Tu S. T. "Engineering Failure Analysis", pág.632-641, 2007.

Ebara R. "Engineering Failure Analysis, Papers presented at the First International Conference on Engineering Failure Analysis", Nº13, pág.516-525, 2006.

⁶¹ Xu Z.L., Park J.P. y Ryu S.J. "Engineering Failure Analysis", Vol.14, pág.694-701, 2007.

⁶² Wang W.Z., Xuan F.Z., Zhu K.L. y Tu S.T. "Failure analysis of gas turbine blades in a thermal power plant". Vol.14, Issue 4, pág.743-749, 2007.

- Cuerpo del rotor: Es el elemento sobre el que reposan los álabes móviles de la turbina.
Materiales: Generalmente, se utilizan aceros ferríticos de la serie 300 con un contenido en Cr del 9-11% y con adiciones de Mo y V para condiciones de trabajo que alcancen los 630-650°C⁶³.
- Estatos: Es la parte dónde se encuentran los álabes fijos.
Materiales: Debido a las elevadas temperaturas de trabajo, los aceros de uso más extendido en estos componentes son los austeníticos 304 y 316.
- Elementos auxiliares para la refrigeración y lubricación.

Generador de vapor “Steam Generator”

El sistema de almacenamiento térmico y el de generación de electricidad se pueden entender como dos sistemas independientes interconectados por el generador de vapor. La sal fundida que se encuentra a elevada temperatura se hace circular a través del generador de vapor calentando el agua que circula por él y generando el vapor.

El sistema de generación de vapor consta de un precalentador, un evaporador, un sobrecalentador y un recalentador. Figura 1.17

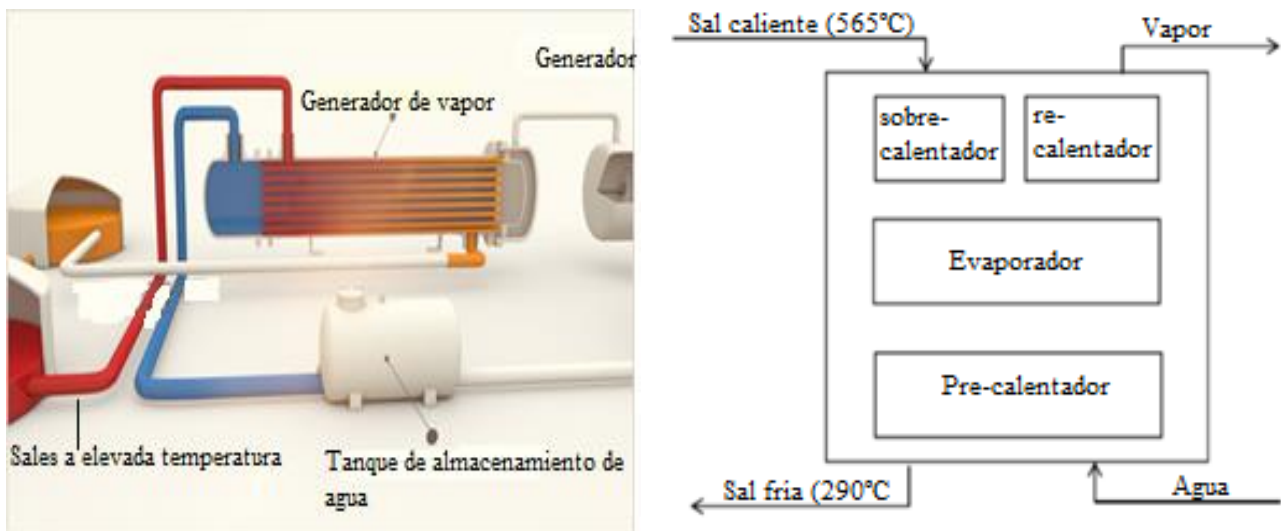


Figura 1.17: Funcionamiento generador de vapor(detalle).
Fuente: CSP technology

⁶³ Niu L.B., Kobayashi, M., Takaku H. y Azuma T. “Aging effect on creep rupture properties of super clean 9%CrMoV steel for steam turbine rotors of combined cycle power plants”, Advances in Engineering Plasticity and Its Applications, pág.931-936. 2004.

El precalentador y sobrecalentador constan de una carcasa o Shell y el intercambiador de una serie de tubos en U, el evaporador es una unidad tipo caldera.

Las sales de nitrato fundidas son transferidas hacia la parte interior de la carcasa del precalentador y sobrecalentador y por fuera del bloque de tubos de la caldera⁶⁴. El agua que alimenta el intercambiador se introduce en el precalentador, dónde se utiliza la sal fría (290°C) que ya ha pasado por el recalentador y el evaporador, para calentar el agua a presión entrante justo por debajo de la temperatura de evaporación. En el evaporador, la sal que se encuentra a media temperatura y que ha pasado por el sobrecalentador, se utiliza para convertir el agua de alimentación en vapor saturado. En el recalentador, la sal proveniente del tanque de sales calientes (565°C), se sobrecalienta el vapor generado en el evaporador. La mezcla de vapor-agua que sale del evaporador se separa en un tambor de vapor y el agua se recicla de nuevo a través del evaporador.

La selección de los materiales que componen el generador de vapor conlleva una serie de características dependiendo de la cantidad de vapor, en Kg/h, a generar y la cantidad de sales fundidas requeridas para el aprovechamiento del vapor generado. De esta manera, podemos contemplar las siguientes opciones:

- **Opción 1:** Generador de vapor tubular diseñado para calentar 52.632 Kg/h de vapor con unas temperaturas de entrada y salida correspondientes a 367°C→540°C para lo cual se requieren algo más de 125.280 Kg/h de sales fundidas que entran a 560°C y salen a 453°C.
- **Opción 2:** Generador de vapor tubular diseñado para calentar 63.324 Kg/h de vapor con unas temperaturas de entrada y salida correspondientes a 370°C→540°C para lo cual se requieren algo más de 292.320 Kg/h de sales fundidas que entran a 560°C y salen a 491°C.
- **Opción 3:** Generador de vapor tubular diseñado para calentar 63.324 Kg/h de vapor con unas temperaturas de entrada y salida correspondientes a 313°C→370°C para lo

⁶⁴ Steingress F.M., Frost H.J. and Walker D.R. “*High Pressure Boilers, 3rd Edition*” American Technical Publishers, Inc. Homewood, IL USA. 2003.

cual se requieren algo más de 292.320 Kg/h de sales fundidas que entran a 491°C y salen a 453°C.

En todos los casos y en vista de las altas temperaturas de trabajo, las recomendaciones a cerca de los materiales a emplear son las siguientes:

- **Opción 1:**

Tubos Intercambiador:	Presión de operación: 34 bar g Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617
Cuerpo Intercambiador:	Presión de operación: 19 bar g/vacío Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617

- **Opción 2:**

Tubos Intercambiador:	Presión de operación: 124 bar g Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617
Cuerpo Intercambiador:	Presión de operación: 19 bar g/vacío Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617

- **Opción 3:**

Tubos Intercambiador:	Presión de operación: 124 bar g Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617
Cuerpo Intercambiador:	Presión de operación: 19 bar g/vacío Temperatura de operación: 593°C Material considerado: INCONEL 617

Mediante consulta bibliográfica se comprueba la enorme importancia del fenómeno de corrosión sufrido por los metales en presencia de sales de nitratos fundidas y el contacto de los mismos con el vapor en los generadores, a temperaturas elevadas.

En el Gráfico 1.1 se muestra la ganancia de material en la pared interna por el efecto del vapor a elevada temperatura en contacto con él para diferentes tipos de aceros con elevado contenido en Cr.

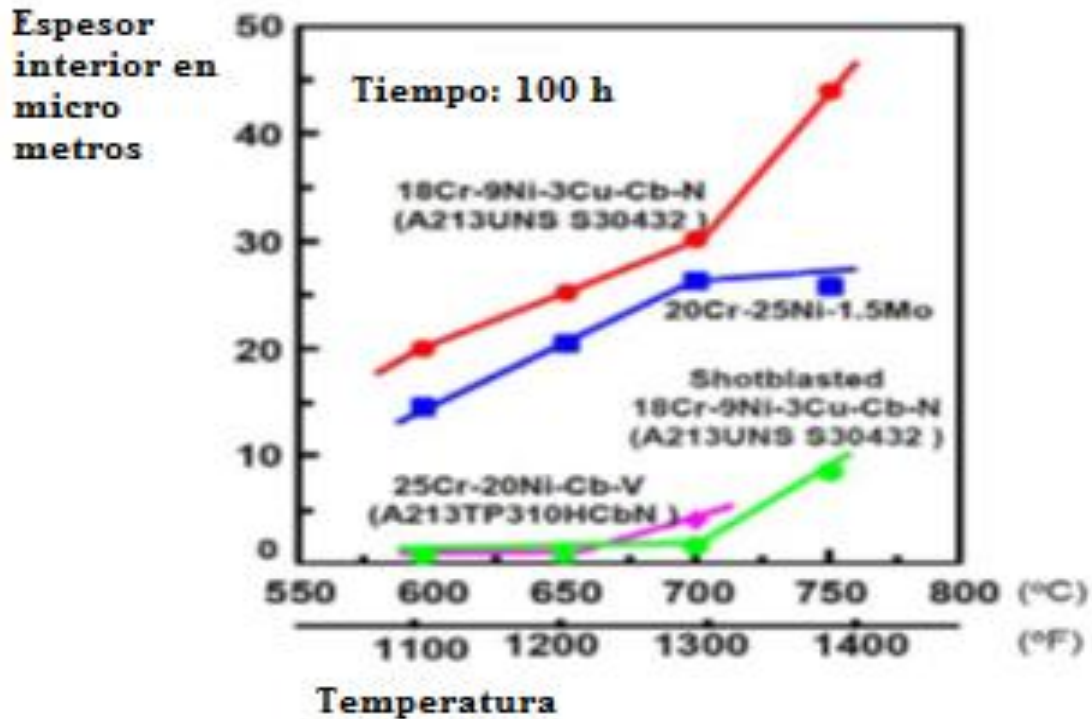


Gráfico 1.1: Ganancia de capa interior de algunos aceros en función de la temperatura⁶⁵.

Fuente: http://www.hitachipowersystems.us/supportingdocs/forbus/hpsa/technical_papers/EP2003B.pdf

Los valores de corrosión empiezan a ser significativos por encima de los 600°C para las diferentes aleaciones y es pues un factor importante porque, actualmente, la mayoría de las plantas termosolares de receptor central de torre trabajan con una temperatura de vapor cercana a los 600°C.

En la actualidad existen otros tipos de intercambiadores para la generación de vapor mediante sales fundidas y son, a parte de los de carcasa y tubos los de bobina helicoidal y los de circuito impreso. Los intercambiadores de bobina helicoidal presentan un coeficiente de transferencia térmica mayor y por ello necesitan superficies de transferencia térmica menores que los de carcasa y tubos y son muy utilizados en el empleo de flujos de dos fases⁶⁶.

Por otro lado, se ha estudiado el rendimiento en la transferencia térmica y su eficiencia en un receptor de torre de sales fundidas mediante tubos en forma de espiral⁶⁷

⁶⁵ Phillips S., Shinotsuka K. Yamamoto and Fukuda Y. "Application of High Steam Temperature Countermeasures in High Sulfur Coal-Fired Boilers", 2003.

⁶⁶ Ramachadran S., Kalaichelvi P. and Sundaram S. "Heat Transfer Studies in a Spiral Plate Heat Exchanger for Water-Palm Oil Two Phase Systems" Brazilian Journal of Chemical Engineering N°25(3), pág.483-490, 2008.

⁶⁷ Yang M.X., Yang X., Yang and Ding J. "Heat Transfer Enhancement and Performance of the Molten Salt Receiver of a Solar Power Tower" Applied Energy. 2009.

consiguiendo una mejora, en la transferencia térmica, muy superior al de tubos rectos convencionales.

Tanques de almacenamiento Térmico

La eficacia del almacenamiento térmico mediante sales fundidas en dos tanques ha sido demostrada en distintas plantas y tecnologías termosolares, y por otro lado, los avances tecnológicos se han dirigido al empleo de la sal solar como compuesto de almacenamiento térmico y como HTF⁶⁸ como ha sido el caso en la planta termosolar “Solar Two” en California, USA y lo que permite una inversión menor en cuanto a intercambiadores se refiere.

Las sales fundidas se encuentran en tanque separados, a diferentes temperaturas que se encuentran en los límites, inferior de 220°C y superior de 600°C⁶⁹ y son capaces de generar vapor que permite el movimiento de las turbinas mediante un ciclo Rankine con una alta eficiencia. Para poder mantener el límite térmico inferior es preciso la calefacción, cuando la radiación solar es insuficiente, y evitar la solidificación de las mismas por disminución de la temperatura por debajo de los 200°C⁷⁰.

El sistema de almacenamiento térmico impide las fluctuaciones en el abastecimiento y mantenerlo en horas en las que el suministro de radiación solar no existe, así como el traslado de picos de producción de acuerdo a las necesidades de la demanda.

Todos los tanques de almacenamiento térmico se encuentran comunicados mediante conductos. El volumen de sales en los tanques, durante los ciclos de carga y descarga, son controlados para la cuantificación de las evaporaciones y posibles formaciones de sólidos que son los causantes del fenómeno de corrosión⁷¹. Para el aislamiento térmico de los tanques, se utiliza un revestimiento de arcilla expandida, lana mineral y silicato cálcico cuya misión no es otra que la de reducir las pérdidas térmicas posteriores laterales y puentes térmicos. Un buen aislante térmico ha de presentar una

⁶⁸ Tyner C.E., Sutherland J.P. & Gould Jr, W.R. “*Solar Two: A molten salt power tower demonstration*”. Sand 95-1828C. 1995.

⁶⁹ Kearney D., Kelly B., Cable, R., Potrovitza. N., Hermann. U., Mahoney. R. & Blake D. “*Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*”. Submission to JSEE, pág.1-20, 2002.

⁷⁰ Cavallaro F., “*Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems*”, Applied Energy, N°87: pág.496-503, 2009.

⁷¹ Lu J., Ding J. and Yang J., “*Solidification and melting behaviors and characteristics of molten salt in cold filling pipe*”. International Journal of Heat and Mass Transfer. N°53(10), pág.1628-1635, 2010.

conductividad térmica baja, ser resistente a las temperaturas sin que se desprendan vapores y resistente a la humedad sin que esta los comprima.



Figura 1.18: Tanques de almacenamiento de sales fundidas.

Fuente: Cobra Energía

El almacenamiento térmico se puede realizar en uno o varios tanques mediante sistemas directos e indirectos explicados anteriormente. Cabe pensar que el uso de utilizar un sistema de múltiples tanques permitiría minimizar los costes de la instalación si fuera el volumen el único parámetro a tener en cuenta, pero en la práctica existe una gran variedad de factores influyentes en ello como son:

- Dificultad en el control de proceso: Complejidad a la hora de controlar los niveles de los líquidos tratándose de varios tanques de almacenamiento. En este aspecto la complejidad del control se hace mayor en días con poca radiación solar.
- Intercomunicación entre tanques de almacenamiento: La interconexión automática entre varios tanques mediante tuberías y válvulas puede llegar a encarecer en gran manera la instalación de la planta.
- Pérdidas térmicas: Los tanques de gran capacidad tienen menos pérdidas térmicas por unidad de volumen de fluido térmico caliente. En el trazado de tuberías y válvulas, es en estas dónde se aprecian mayores pérdidas térmicas.

La máxima reducción de volumen en un tanque de almacenamiento se consigue cuando dicho volumen es equivalente al volumen del fluido térmico

almacenado y esto se puede conseguir mediante el sistema de almacenamiento conocido como “*Thermocline*”. En el mismo tanque se encuentra la sal fría (290°C) y la caliente de tal forma que inicialmente el tanque se encuentra lleno de la sal fría (290°C) y se retira por la parte inferior del tanque y se calienta transfiriéndola al receptor de la torre. La sal caliente (565°C) procedente de la torre se transfiere al tanque por la parte superior de este. Si la operación se realiza correctamente, la sal caliente (565°C) que es menos densa se aloja sobre la sal fría (290°C), en la parte superior del depósito debido a su menor densidad creando lo que se conoce como *Thermocline*. Este sistema de almacenamiento está siendo muy estudiado debido a su potencial de almacenamiento mediante reducción de volumen. Por otro lado, se pueden establecer Thermoclines estables mediante el diseño de difusores de entrada y salida del depósito de las mezclas de sales frías (290°C) y calientes consiguiendo pequeñas regiones de transición de las sales calientes (565°C) y frías.

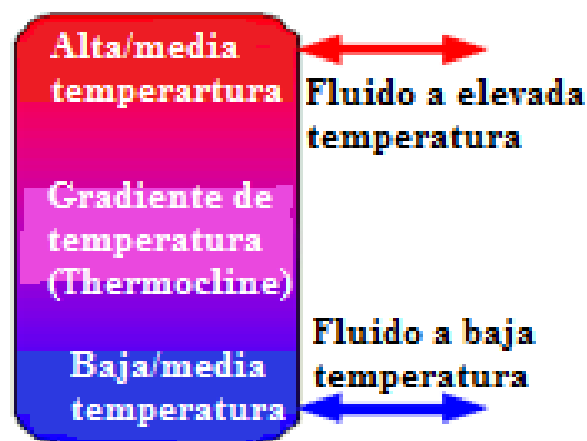


Figura 1.19: Sistema de almacenamiento térmico “*Thermocline*”
Fuente: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy

En cuanto a los principales materiales que componen los tanques de almacenamiento se pueden diferenciar de acuerdo a si se utilizan en uno u otro tanque de almacenamiento dependiendo de las temperaturas de trabajo de los mismos. Así, los tanques de almacenamiento de sales “frío” habitualmente se fabrican en acero al carbono y los que trabajan con las mezclas de sales a mayor temperatura, tanques de almacenamiento de sales “caliente” y los de la torre central, lo hacen en aceros inoxidables adaptados para trabajar a elevada temperatura. En este estudio se van a considerar para todos los componentes que albergan las sales calientes (565°C), la aleación rica en Ni, INCONEL 617 y para los que lo hacen con las sales frías (290°C), el

acero inoxidable AISI 347 H. Otros tipos de aceros y aleaciones como del tipo AISI 316, AISI 347 y distintas aleaciones ricas en Ni, han sido previamente probados en este medio⁷².

1.4.5.- Estado tecnológico de las CSP de receptor central de torre

La primera central termosolar con la tecnología de receptor central fue la denominada “Solar One” de 10 MW ubicada en Barstow, California, disponía de 1.818 heliostatos de 40 m² cada uno ocupando una superficie de 72.650 m² y demostró la viabilidad de las centrales de receptor central de torre, produciendo más de 38 millones de kW/h de electricidad durante su funcionamiento desde 1982 hasta 1988. La termosolar Solar Two fue un rediseño de la “Solar One” mediante la adición de un segundo anillo de 108 heliostatos de mayor tamaño que los anteriores, 95 m², obteniendo una cantidad total de 1.926 que ocupaban una superficie de 87.750 m², para demostrar las ventajas de la incorporación de transferencia de calor y almacenamiento térmico mediante sales fundidas consiguiendo implantar la alta eficiencia de este tipo de almacenamiento gracias a la eficiente acumulación de la energía solar y la generación eléctrica incluyendo la capacidad de producir de forma rutinaria electricidad durante el tiempo nublado y nocturno. Se consiguió la generación de electricidad, mediante este sistema, durante 24 horas al día, 7 días consecutivos.

El éxito conseguido por la CSP “Solar Two” despertó el interés mundial por las centrales termosolares con tecnología de receptor central de torre. Ante las perspectivas ocasionadas por el funcionamiento de la termosolar “Solar Two” apareció el interés de un consorcio internacional, liderado por la industria estadounidense como fueron Bechtel y Boeing (con el apoyo técnico de Sandia National Laboratories), para implantar la tecnología de plantas termosolares de este tipo en todo el mundo, especialmente en España (donde las primas a las renovables y en concreto a las solares consiguieron hacer de estas un tipo de tecnología rentable), también en Egipto, Marruecos e Italia. Su primera planta para uso comercial pasó a ser cuatro veces el tamaño del “Solar Two” (unos 40

⁷² Goods S.H. and Bradshaw R.W., “Constant extension rate testing of IN625LCF in molten nitrate salt”. Corrosion Science, N°41(6): pág.1119-1137, 1999.

Goods S.H., “The Effect of a Molten Nitrate Salt Environment on the Mechanical Properties of INCOLOY Alloy 800. Journal of Materials for Energy Systems, N°5(1). 1983.

MW equivalente, utilizando el almacenamiento para alimentar una turbina de 15 MW hasta 24 horas por día).

Como continuación a ésta y demostrada su eficiencia, se construyó en España, por la empresa Torresol Energy, una nueva planta (GEMASOLAR) con esta tecnología y siguiendo los pasos iniciados por la “Solar One”, con una potencia de 15 MW mediante la incorporación de 2.493 heliostatos de vidrio de alta reflexión y superficie de 96 m² cada uno ocupando una superficie terrestre de 240.000 m² y almacenamiento térmico mediante tanque de sales fundidas que le proporciona una autonomía de almacenamiento de 600 MW/h lo que le permite funcionar siete días a la semana las 24 horas del día en los meses de verano. En la actualidad produce 19.9 MW de potencia estando operativa desde el año 2011.

En la actualidad se está construyendo una planta similar en California, una planta de 30 a 50 MW con el mismo diseño y capacidad de la española, GEMASOLAR, con el fin de reducir costos, mientras que proporciona la capacidad en horas pico muy necesaria para la red de la parte oeste de USA. La primera de estas plantas costaría del orden de 100 millones de dólares y la producción de energía por alrededor de 15 centavos de dólares/kWh. Aunque el empleo de nuevas tecnologías, así como el apoyo de las administraciones públicas podrían conseguir reducir el coste de generación hasta 7 centavos de dolar/kWh.

La tecnología de plantas termosolares de receptor central de torre con carácter comercial comenzó mediante el sistema de agua como fluido de transferencia térmica y generación de vapor saturado hasta 280°C hacia la turbina de generación de electricidad.

Posteriormente se mejoró, esta tecnología, trabajando con un aumento de las temperaturas a la salida del receptor, con vapor sobrecalentado a 500°C y, por otro lado, mediante el empleo de sales fundidas a una temperatura de 560°C.

En la actualidad, también se encuentra en desarrollo la técnica de uso de aire comprimido como medio de transferencia térmica en combinación con una turbina de gas de tal manera que el receptor sustituye a la cámara de combustión de una turbina de gas convencional.

Una variante de las experiencias anteriores combina las elevadas eficiencias de la tecnología solar junto con un ciclo combinado de gas y turbina de vapor.

Actualmente, la potencia generada por las centrales termosolares con tecnología de receptor central de torre varía entre 10 y 100 MW_e consiguiendo la mayor potencia para distancias mayores entre receptor y heliostatos, pero también un aumento en las pérdidas de absorción de la radiación solar por la atmósfera.

Una de las empresas punteras en el desarrollo de esta tecnología es la española Abengoa Solar con instalaciones ya implantadas y en uso como son la PS10 y PS20, en Andalucía. Apoyadas en esta tecnología, se han desarrollado plantas de este tipo por las empresas Brightsource Energy, Sener y ESolar, entre las que se encuentra la central termosolar GEMASOLAR desarrollada por Sener y propiedad de Torresol Energy, actualmente en operativa y obteniendo una elevada reducción de costos por el incremento de la eficiencia total y una apreciable capacidad de almacenamiento térmico mediante la tecnología de sales fundidas.

Dada la elevada eficiencia conseguida por la planta GEMASOLAR, Torresol anunció, a partir del año 2013, la construcción de 4 plantas de 50 MW_e.

Apoyándose en la tecnología de la planta GEMASOLAR, la empresa Brightsource Energy, en negociaciones con Pacific Gas en el año 2008, proyectó la generación de 900 MW_e conformando el mayor compromiso de generación de energía eléctrica mediante esta tecnología. Actualmente, Brightsource Energy ha desarrollado una serie de plantas con esta tecnología en California, Nevada (USA) y en Israel.

La empresa Eskom está desarrollando, en Sudáfrica, una central de 100 MW_e con un campo solar de 5000 heliostatos en un área próxima a Upington.

Todos estos datos demuestran el impulso que ha tomado la tecnología de receptor central de torre y por ello todos los esfuerzos en innovación se dirigen hacia la consecución de los siguientes puntos:

- Heliostatos de mayor superficie, por encima de 150 m² cada uno que permite una reducción de costes considerable.
- Receptores mejorados que permitan trabajar con fluidos de transferencia de alta temperatura de forma que se vea incrementada su eficiencia hasta casi un 30%.

- Campos solares con varias torres con receptor que permiten la reducción de costes y aumentar la eficiencia, aunque se trata de plantas más complejas.

1.5.- Evaluación del impacto medioambiental

La generación de energía en todas sus formas, provoca determinados efectos sobre el medio ambiente, pero teniendo en consideración los beneficios aportados por las centrales termosolares, su comportamiento medioambiental es mucho menos dañino que el de las plantas de generación de energía mediante combustibles fósiles.

El hecho de que las centrales termosolares de potencia no utilicen combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica supone la inexistencia de los impactos ocasionados por la extracción del carbón, derrames de crudo en las plataformas petrolíferas y las fugas de gas metano ocurridas en la extracción de gas, como mayores incidencias.

Por otro lado, en las centrales termosolares, la necesidad de utilizar materias primas como acero u hormigón, es alta a pesar de que los materiales utilizados en los diferentes sistemas que componen una planta son de fácil disponibilidad y en su mayor parte reciclables.

También se encuentran los obstáculos provocados por la escasez de agua en determinadas zonas áridas, la disponibilidad del terreno o el uso de aceites sintéticos como HTF en algunas variantes de este tipo de tecnología, para el almacenamiento térmico indirecto junto con el uso de determinados agentes tóxicos que pretenden evitar el crecimiento de determinado tipo de vegetación en el campo de heliostatos.

Debido a lo mencionado anteriormente, se encuentran en desarrollo, mejoras técnicas que permitan la reducción de las diferentes categorías de impacto. Esto nos conduce a pensar que el avance tecnológico en todo el sector de las termosolares permita incrementar la eficiencia y la reducción de los impactos medioambientales.

Como resumen a los comentarios anteriores se puede asegurar que las centrales solares de concentración proporcionan importantes beneficios ambientales si las

comparamos con las fuentes de energía convencionales, contribuyendo al desarrollo sostenible y su uso aporta mejoras ambientales⁷³ como:

- Disminución de las emisiones de CO₂
- Disponibilidad de agua
- Regeneración del uso del suelo
- Disminución en las líneas de energía requeridas

Desde el punto de vista social y económico se contemplan otra serie de beneficios:

- Pérdida de la dependencia en la importación de combustibles
- Garantía de abastecimiento y distribución de la energía
- Creación de puestos de trabajo
- Evitar la regulación del mercado energético
- Conseguir el suministro energético a zonas deprimidas

Las cargas ambientales son dependientes del tamaño de la planta termosolar y se asocian a la pérdida del campo visual o ruido y pueden ser reducidos mediante⁷⁴:

- Localización de la planta mediante una evaluación de los diferentes lugares y la estimación del impacto previsto.
- Utilizar la tecnología de mayor desarrollo.
- Evaluación de beneficios y costes globales.
- Implicación de los organismos públicos en el diseño y finalidad de la central termosolar para conseguir la aceptación popular.

A continuación, se procede a revisar los diferentes impactos ambientales que influyen en una central termosolar con tecnología de receptor central de torre y que son los siguientes:

-Uso del agua:

Como se ha visto, la tecnología de generación energética por concentración solar de potencia necesita grandes cantidades de radiación solar directa y por lo tanto su óptima ubicación se da en regiones áridas y generalmente están diseñadas para el aporte de agua para los ciclos térmicos. Normalmente, las regiones áridas presentan deficiencias en

⁷³ Boyle G., “*Renewable Energy. Power for a Sustainable Future*” The Open University, Oxford Press, London. 1996.

⁷⁴ Gekas I. V., Frantzeskaki N. and Tsoutsos T., “*Environmental Impacts from the Use of Solar Energy Technologies*”, THERMIE-B STR/1000/96/HE project. 1996.

cuanto a la existencia de agua y es por este motivo que en estas regiones se pueda suplir la necesidad de agua mediante tecnologías que no demanden cantidades exageradas o la refrigeración se lleve a cabo mediante aire, aunque esto reduce la eficiencia en la generación de energética de la planta.

Como ejemplo a todo esto se puede poner el de una planta CSP de colectores cilindro-parabólicos de 50 MW en la que la necesidad de agua para la refrigeración es de alrededor de $0.4 \text{ m}^3/\text{año}$, el equivalente al regadío de la misma superficie ocupada por los colectores, por el contrario, estudios realizados para la misma tecnología⁷⁵ y para una central tipo de 100 MW determinan una reducción en el consumo de agua de 3.3 l/KW_h producido mediante el empleo de refrigeración seca aunque la inversión en este tipo de equipos es mayor y la eficiencia de la planta, como se dijo anteriormente, disminuye.

Otro tipo de operación en la que se consume agua, dentro del campo solar, aunque en mucha menor proporción que en la operación de refrigeración, es la limpieza de los espejos de los heliostatos con el fin de mantener su óptima reflectividad y su consumo puede ser más elevado en zonas en las que pueden darse tormentas de arena que depositen cantidades apreciables de polvo y suciedad en los espejos lo que conllevará a una limpieza más frecuente.

- Uso del terreno e impacto visual:

El uso del suelo se refiere a la superficie ocupada por un determinado sistema perteneciente a la central termosolar y se presenta en relación a la energía generada por la planta y año expresado en $\text{m}^2/\text{MW}_h \text{ año}$.

El impacto visual se corresponde al cociente entre la zona sobre la que una planta termosolar perturba el entorno a ella, expresada en m^2 , y la energía generada en un año en $\text{MW}_h \text{ año}$.

Expresado así, el impacto visual de una central termosolar con tecnología de receptor central de torre, presenta el valor más elevado, Sin embargo, debido a los requerimientos ambientales precisos para estos sistemas, se suelen implantar en zonas de

⁷⁵ Burkhardt J., Heath G. and Turchi C., “Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives”. Environmental Science and Technology N°45(6), pág.2457-2464, 2011.

baja densidad de población por lo que, al tratarse de zonas de poca riqueza paisajística, el impacto visual es insignificante.

-Vertidos frecuentes e imprevistos de contaminantes:

Desde que la planta termosolar comienza a operar podrían aparecer, durante su funcionamiento, diferentes tipos de vertidos como derrames o fugas de diferentes compuestos con el riesgo de contaminación ambiental⁷⁶.

- Fabricación y procesado de materiales:

El aporte de la energía necesaria para la fabricación de los materiales utilizados en las plantas termosolares supone emisiones de diferentes compuestos en forma de CO₂, SO₂ y diferentes tipos de óxidos de nitrógeno. El impacto generado por estas emisiones es variable según el lugar, pero muy inferior a los generados por las tecnologías de generación de energía eléctrica mediante el empleo de combustibles fósiles.

- Construcción:

Se trata del impacto ambiental generado durante la fase de construcción de la planta como por ejemplo los efectos sobre el ecosistema de la zona, contaminación acústica, impacto sobre el paisaje etc.⁷⁷.

- Impacto sobre el ecosistema, flora y fauna:

Este tipo de impacto puede surgir durante las fases de construcción y de funcionamiento de la planta, sobre la vegetación y el terreno. Contrariamente a lo que se puede pensar, el efecto de los heliostatos tiene un efecto beneficioso sobre la vegetación al generar un microclima y con respecto a la fauna decir que los sistemas de concentración de la radiación solar son zonas evitadas por las aves en general⁷⁸.

- Impacto acústico:

El impacto acústico generado por una planta termosolar sin almacenamiento térmico es poco significativo en cuanto a su incidencia sobre la población, ya que se origina durante el día, no así para las que presentan almacenamiento térmico ya que este provee de un funcionamiento continuo incluso en las horas nocturnas. Este tipo de

⁷⁶ OECD/IEA “*Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables*”, international Energy Agency, Paris, France. 1998.

⁷⁷ Theodoratos P.C. and Karakasidis N.G., “*Hygiene - Occupational Safety and Environmental impact assessment and risk analysis*” 1575 Environmental protection, Ion, Greek, 1997.

⁷⁸ Tsoutsos T., “*Environmental Impact Assessment Foe Energy Projects*”, Environmental Department, Technical University of Crete. 2001.

impacto es provocado por las turbinas, bombas y grupos electrógenos destinados a diversos fines.

- Impactos sobre la salud y seguridad:

Por el hecho de trabajar con diferentes tipos de fluidos, la emisión accidental de ellos, agua, sales o aceites, podrían constituir un peligro para la salud. Otro posible daño a la salud y en concreto a la visión, podría suceder debido a la intensidad de la luz concentrada en el campo solar, aunque no es un tipo de daño considerable.

- Impactos sociales:

Este tipo de impacto es beneficioso durante las fases de construcción y funcionamiento de la planta por los puestos de trabajo que genera y la aceptación del público en general por tratarse de una tecnología de generación de energía limpia.

En apartados posteriores contemplaremos este tipo de impactos con mayor precisión mediante una serie de indicadores que aportarán una visión más real de los beneficios de este tipo de tecnologías, aunque teniendo en cuenta lo anterior si se pueden deducir, de forma inmediata, unos beneficios socio-económicos significativos.

Una consideración a todo esto nos lleva a decir que cualquier desarrollo tecnológico promovido por el ser humano, no puede evitar, completamente, todos los impactos provocados sobre el medio ambiente, y este tipo de instalaciones es uno de ellos.

Las cargas ambientales asociadas a la armonía del entorno van a depender del tamaño y la naturaleza de la instalación y de dónde se vaya a situar, pero los efectos negativos ocasionados por los impactos medioambientales son, generalmente, pequeños y subsanables en gran parte aplicando medidas correctoras a través del desarrollo de nuevas tecnologías en los equipos que componen la planta.

1.5.1.- Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En su definición, el Análisis de Ciclo de Vida o ACV es un proceso realista de evaluación de las cargas ambientales vinculadas a un producto, proceso o actividad a través de la identificación y cuantificación de usos y entradas y salidas de materia y

energía al medio ambiente, y para la evaluación e implementación de mejoras ambientales⁷⁹.

Como se aprecia en la Figura 1.20, el análisis comprende el ciclo de vida del producto en su totalidad, del proceso o la actividad incluyendo el proceso de extracción de materias primas, el procesamiento, el transporte y distribución, su uso, la reutilización si fuera posible, el mantenimiento, el reciclaje y la disposición final.

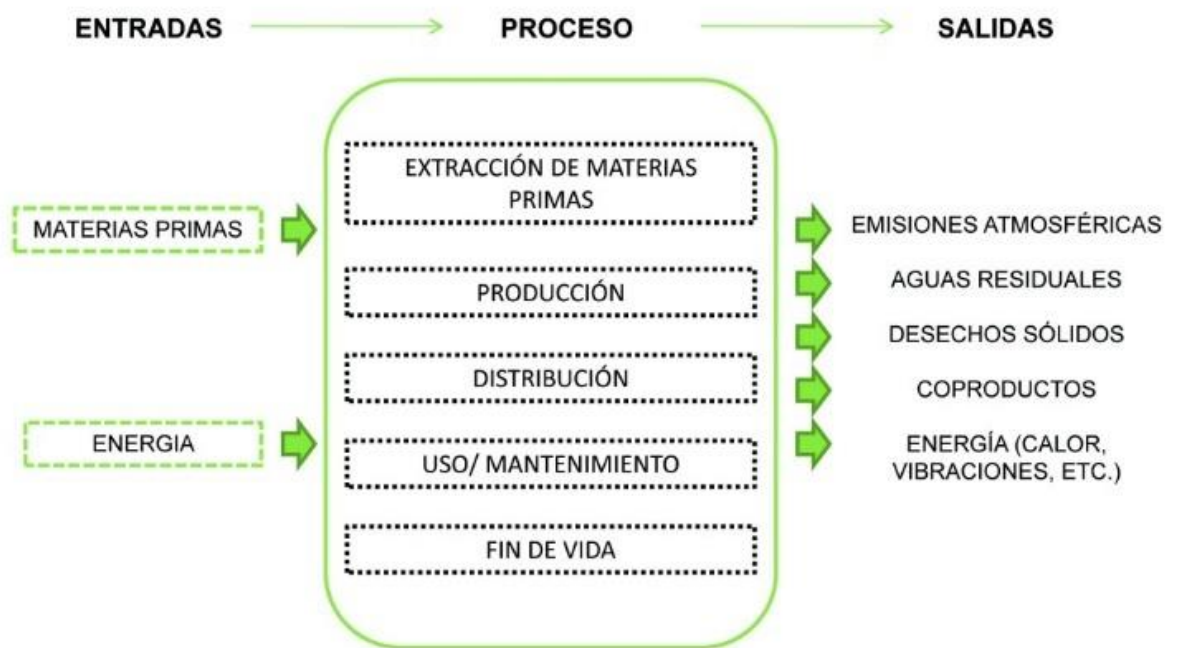


Figura 1.20: Procesos durante el ciclo de vida.

Fuente: <http://www.certificadosenergeticos.com/analisis-ciclo-vida-diseno-materiales-sostenibles>

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es una federación mundial de organismos de normalización que mediante comités técnicos se preparan las normas internacionales y cada organismo miembro que está interesado en una materia establecida mediante un comité técnico, está representado en él. Las organizaciones internacionales, coordinada con la organización internacional de normalización colabora con la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) en todas las materias de normalización de esta categoría.

⁷⁹ ISO 14040.2 Draft: Life Cycle Assessment - Principles and Guidelines. The Society of Environmental Toxicology and Chemistry <http://www.setac.org>.

Las normas internacionales se redactan de acuerdo a las normas establecidas en las directivas ISO/IEC y la principal tarea de los comités técnicos es preparar las normas internacionales. Los anteproyectos de las normas internacionales preparados por estos comités, son enviados a los organismos miembros para su aprobación, teniendo que ser esta votada por al menos un 75% de los organismos con derecho a voto.

La norma ISO 14044 fue preparada por el comité técnico ISO/CT 207, Gestión Ambiental, Subcomité SC 5, Evaluación del Ciclo de Vida y esta primera edición de la ISO 14044 junto con la ISO 14040:2006 anula y sustituye a la norma ISO14040:1997, ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000 que han sido revisadas técnicamente.

La creación de este tipo de normas relacionadas con el medio ambiente, surgen por la concienciación en la protección del mismo, así como los impactos asociados a los productos, fabricación y consumo, incrementando el interés en el desarrollo de métodos para comprender y minimizar los impactos aparecidos. La técnica que ha adquirido un desarrollo mayor para este objetivo es el análisis del ciclo de vida (ACV).

Atendiendo a la antigua norma ISO 14040, englobada en la ISO 14044, el Análisis de Ciclo de Vida se define como una técnica de evaluación de aspectos e impactos ambientales potenciales asociados a un producto mediante la clasificación de un inventario de entradas y salidas de una serie de productos destacados, la evaluación de impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas y, finalmente, la interpretación de los resultados obtenidos en las fases de inventario del ciclo de vida y la evaluación del impacto en relación con el objetivo perseguido⁸⁰.

En concreto, el ciclo de vida hace referencia a las principales funciones, de un producto, en el tiempo de vida del mismo, partiendo desde el proceso de extracción de materias primas y su fabricación mediante ellas, su uso, el mantenimiento que conlleva su aptitud para una finalidad y su disposición final. En este proceso también se valora el impacto que genera sobre el medio ambiente. La evolución del análisis mediante estas etapas conduce a una interdependencia de tal forma que una operación conduce a la

⁸⁰ ISO (International Standard Organization) 14040:2006, *Environmental Management –Life cycle assessment. Principles and framework*. international Organization for Standardization (ISO).

siguiente permitiendo la estimación de los diferentes impactos ambientales acumulados a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida del producto.

En cuanto al límite del sistema, el enfoque del alcance de un ACV más corriente, es el conocido como *cradle to grave*, de la cuna a la tumba, pero no es el único, algunas variaciones sobre esto en lo que respecta a un ACV son las siguientes:

Cradle to Cradle o análisis de la cuna a la cuna: En este proceso se incluyen los pasos posteriores al uso y en el que se refleja el reciclaje gracias al cual el propio producto genera una parte de sí mismo o un producto diferente.

Cradle to Gate o análisis de la cuna a la puerta: En este proceso se tienen en cuenta los daños ambientales desde la extracción de materias primas hasta el abandono del producto, de la factoría sin estar incluida la distribución del mismo.

Gate to Gate o análisis de la puerta a la puerta: Se trata de un ACV parcial en el que sólo se contempla un proceso determinado, de todo el ciclo de vida.

Well to Wheel o análisis del pozo a la rueda: Tiene que ver con el transporte por carretera y se trata, de forma específica, la eficiencia de los combustibles.

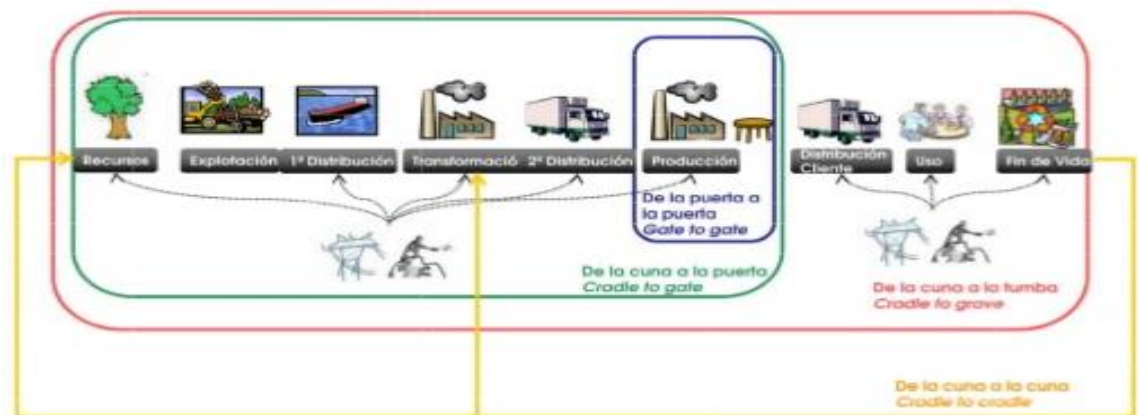


Figura 1.21: Diagrama de un ACV teniendo en cuenta el alcance.

Fuente: Lavola, Sima Pro 8

En un Análisis de ciclo de vida, el impacto ambiental vincula dos aspectos, el ambiental y el energético permitiendo, a través de su estudio, su aplicación para el estudio de esos aspectos.

El propósito de realizar un ACV conduce a la recopilación de datos en diferentes niveles de exigencia pudiendo ser de manera general o de forma precisa, todo ello justificado mediante los límites del sistema que nos marquemos y cuya finalidad será el objetivo y servicio requerido por el ACV⁸¹.

El Análisis de Ciclo de Vida de un producto determinado se puede realizar desde tres puntos de vista:

- *Desarrollo del producto*: En este caso, el proceso es enfocado hacia el medio ambiente mediante diferentes opciones en cuanto a la selección de diferentes recursos y materiales de tal forma que, dependiendo de esta selección, el ciclo de vida del producto se verá afectado, en mayor o menor medida, durante las etapas contempladas⁸². Por este motivo, el AVC para el desarrollo de un producto precisará de la recopilación de una gran cantidad de datos y por tanto mucho tiempo invertido aunque existe la posibilidad de reducirlo mediante una simplificación⁸³, de tal manera que el estudio se concentre en los materiales y recursos que tengan gran incidencia sobre el medio ambiente y que nos permita aportar alternativas al desarrollo inicial, incluso si la dependencia fuera debida al proceso de fabricación o cualquier consideración en cuanto a los límites de su estudio.

- *Mejora del producto*: La ejecución del ACV para la mejora de un producto ya desarrollado es un proceso más sencillo en cuanto a la recopilación de datos y centrándose en la incidencia significativa de los diferentes materiales y recursos sobre el producto. Esto permite la comparativa de varios productos de la misma categoría, desde el punto de vista medioambiental mediante la evaluación del impacto provocado por cada uno. Se incorpora el resultado alternativo de los materiales con mayor impacto en cada una de las fases del ciclo de vida y se analizan los resultados obtenidos⁸⁴.

- *Marketing*: Para el caso de un ACV para la finalidad de un marketing ambiental, dentro de los diferentes tipos que se pueden desarrollar, el de mayor importancia es el conocido

⁸¹ Ding G.K.C., “Sustainable construction, the role of environmental assessment tools”, Journal of Environmental Management num.86, pág.451–464. 2008.

⁸² Tillman A.M., “Significance of decision-making for LCA methodology”, Environmental Impact Assessment Review N°20, pág.113-123, 2000.

⁸³ Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S. “Life cycle assessment in buildings: State of art and simplified LCA methodology as a complement for building certification”, Building and Environment, N°44, pág.2510-2520, 2009.

⁸⁴ Lewis H. and Gertsakis J., “Design Environment, a global guide to designing greener goods”, Green leaf publishing, UK, ISBN 1874719438, 2011.

como etiquetado ambiental o ecológico⁸⁵ que se considera como la justificación de que determinado producto es respetuoso con el medio ambiente y siendo así, dicho producto es asignado por una etiqueta ecológica que provoca su afinidad para fines de marketing y por tanto atractivo para el consumidor.

Otro aporte asociado al marketing es la declaración ambiental de producto, DAP, cuya finalidad es la de aportar información gráfica de un determinado número de impactos ambientales asociados mediante codificación diferente como puede ser QR o código de barras que facilita la interpretación.

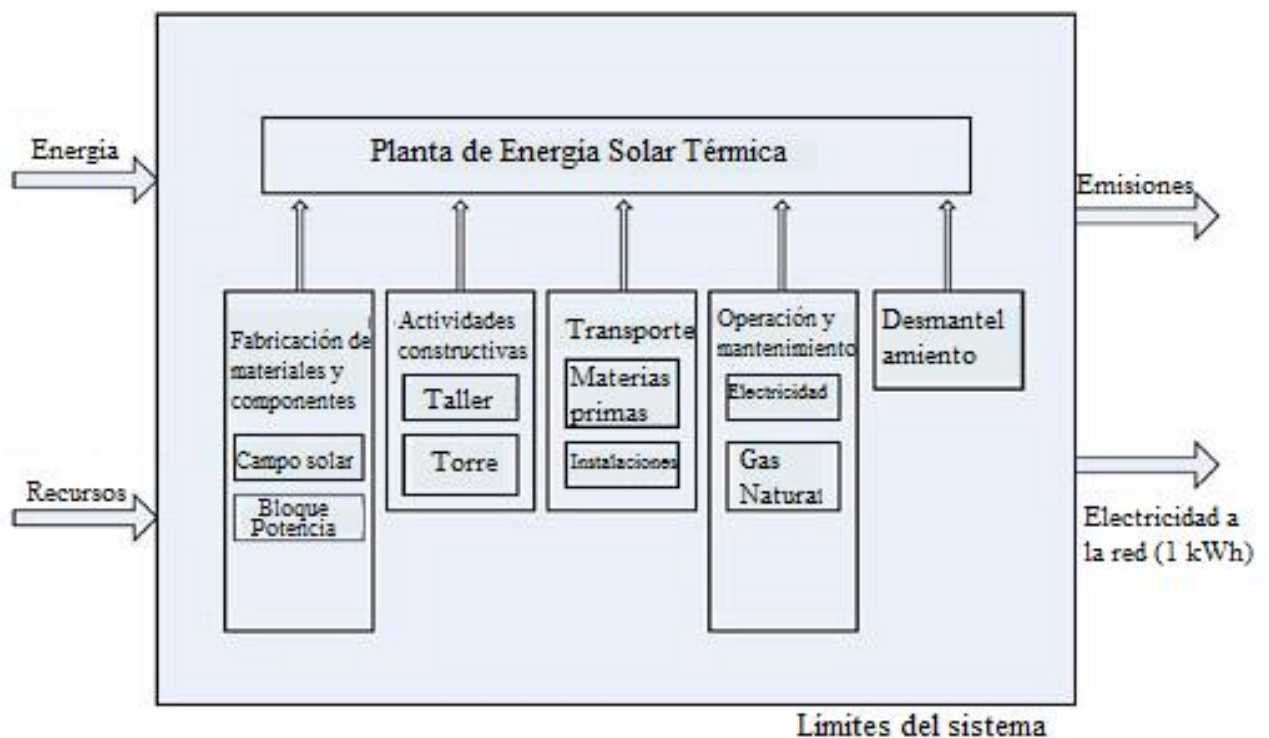


Gráfico 1.2: ACV genérico de una planta CSP.
Fuente: <http://www.nap.edu/read/12987/chapter/13#226>

1.5.2.- Ámbito general y Etapas de un ACV

Como se vio anteriormente, la huella de carbono cuantifica la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, medidas en Kg de CO₂ equiv., que son liberadas a la atmósfera debido a un producto u organización. El cálculo de la huella de carbono

⁸⁵ Life Cycle Assessment (LCA) – “A guide to approaches, experiences and information sources”, EEA, Denmark, ISBN: 92-9167-079-0, 1998.

permite la evaluación de las contribuciones, de las organizaciones, al cambio climático para conocer su procedencia y conseguir su reducción.

Atendiendo a la norma ISO 14064, las organizaciones cuantifican la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera, debidas a su actividad y en cuanto a un producto cuantifica la cantidad de estas emisiones liberadas a la atmósfera debido a los procesos asociados a la vida del mismo, toda la cadena de valor, desde la obtención de las materias primas hasta el fin de vida.

La huella de carbono de un producto viene regulada por la norma ISO 14067:2013, PAS 2050:2011 y GHG Protocol Product Accounting y la huella de carbono de una organización por la norma ISO 14064, GHG Protocol y Billan Carbone.

La norma ISO 14067:2013 aporta la cuantificación, mediante estándares internacionales ISO 14040 e ISO 14044 y la comunicación de la huella de carbono de un producto mediante etiquetas y declaraciones ambientales mediante las normas ISO 14020, ISO 14024 e ISO 14025. También aporta especificaciones para el desarrollo de reglas de categoría de producto y los desarrollados de acuerdo a la ISO 14025.

Teniendo en consideración la ISO 14044, para conseguir un entorno de trabajo es necesaria la realización de un ACV mediante la consideración de los siguientes pasos o etapas:

- Definición de Objetivo y Alcance
- Análisis de Inventario
- Evaluación o Análisis de Impacto del Ciclo de Vida
- Interpretación del Ciclo de Vida
- Presentación de Informes y Revisión Crítica del Ciclo de Vida
- Limitaciones del Análisis de Ciclo de Vida
- Relación entre las diferentes fases del Ciclo de Vida
- Condiciones para el uso de Opciones de Valor y Elementos Opcionales

La ISO 14044 engloba la evaluación del ciclo de vida y los estudios e inventario del mismo y no está prevista para fines de registro, reglamentarias y certificación⁸⁶

⁸⁶ ISO 14044:2006, “*Environmental management, Life cycle assessment, Requirements and guidelines*”. Online Browsing Platform (OBP), 2006.

proporcionando el camino en la determinación del objetivo y campo de estudio de un ACV y para la elaboración del inventario de entradas en el sistema del producto. Después, se centra en la fase analítica de impactos y finalmente nos facilita la interpretación de resultados obtenidos⁸⁷. Estos pasos, se reflejan en el esquema inferior del Gráfico 1.3.

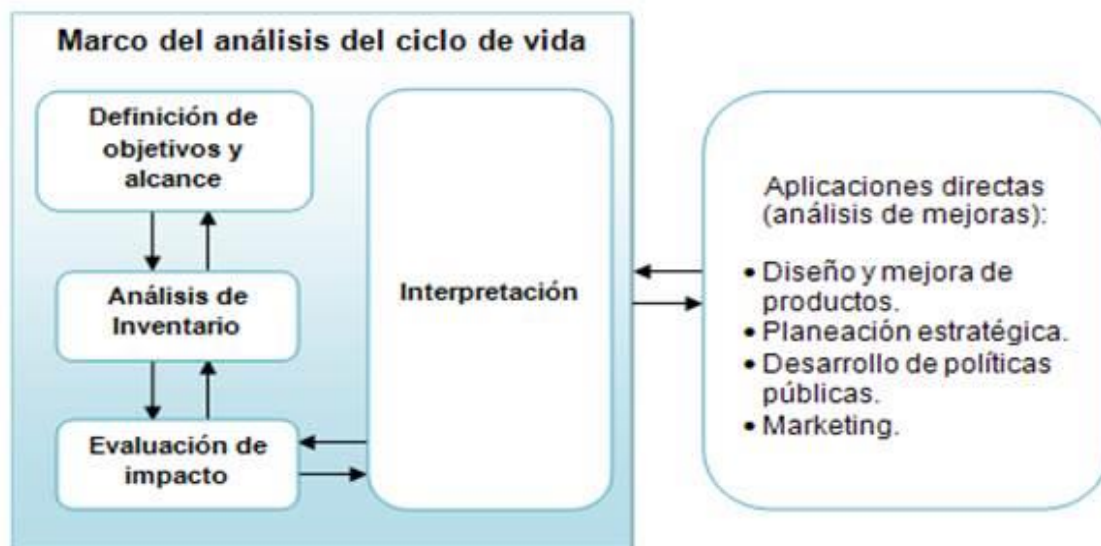


Gráfico 1.3: Ámbito de trabajos de un ACV según ISO 14044.

Fuente: ISO 14044 (2006)

Para entender estos procesos se procede a explicar la principal nomenclatura aparecida en un ACV, adoptada por la comunidad científica:

- *Categorías de Impacto*: Este tipo de categoría expresa las consecuencias ambientales debidas a los procesos o sistemas de productos a través del inventario y el sistema medioambiental que conduce la categoría. Estas categorías han de ser suficientemente amplias y significativas para su comprensión por parte de la mayoría de las personas interesadas y las incluidas en el ramo. Por este motivo, las principales categorías llevan como nomenclatura los términos, salud humana, consecuencias ecológicas etc.

- *Indicador de Categoría de Impacto*: Se trata de una categoría cuantificada y la norma ISO 14044 establece como criterio de selección de determinado indicador de impacto las consecuencias fundamentales del sistema de operación.

⁸⁷ ISO/TS 14048 (Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida (2002) y ISO/TR 14047 (Norma sobre Gestión Ambiental)

- *Modelo de Caracterización*: Es el soporte teórico que transforma los resultados del Inventario de Ciclo de Vida en impactos expresados en los índices de categoría.
- *Factor de caracterización*: Es el factor que se deriva del modelo de caracterización utilizado para la conversión de los resultados asignados por el inventario, en la unidad común del indicador de categoría de impacto.

1.5.2.1.- Definición de Objetivo y Alcance

Es la primera fase en un estudio de ACV y se exponen de acuerdo a la aplicación considerada y los motivos que inducen el estudio. Se trata del cálculo de la contribución potencial de un producto al calentamiento global, el CO_{2equiv} cuantificando las emisiones y captaciones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del producto.

Dentro de esta fase, se ha de establecer lo que se conoce como unidad funcional que se puede definir como la cuantificación de la función identificada con el objeto de proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas del sistema en estudio de tal manera que nos permitirá valorar y comparar de manera objetiva, los impactos generados. La unidad funcional puede ser del tipo físico y del tipo funcional.

La asignación de cargas a la unidad funcional se realiza mediante el principio de causalidad mediante el que se asignan las cargas al producto que las causa, o bien al producto por el cual existe dicha actividad. Si este principio no se puede aplicar, se puede recurrir a otros métodos como cantidad, volumen, etc.

Después de la definición del objetivo, se ha de especificar el alcance del ACV que es el que acotará los límites del sistema que determinan los procesos individuales incluidos en el mismo. El límite del sistema determina los procesos unitarios que se incluyen en un ACV y deben reflejar el objeto de estudio.

Esta primera fase es esencial en un ACV y tiene una gran influencia en los parámetros correspondientes a la posterior evaluación de impactos como por ejemplo el tiempo y los recursos necesarios, el propósito del estudio, su aplicación, los límites del sistema, metodología evaluativa. El alcance del estudio establece la complejidad y el grado de detalle de un ACV y debe ser consistente con el objeto de estudio mediante la especificación del sistema de estudio y sus funciones, la unidad funcional, los límites del

sistema, los datos, asignación de cargas y las hipótesis, principalmente el uso del suelo y el fin de vida.

Los límites del sistema son la base para determinar qué procesos se incluyen en el estudio y serán diferentes dependiendo del uso previsto del estudio del cálculo de la huella de carbono que deberá incluir las emisiones y captaciones partiendo de las materias primas hasta la puerta de fábrica.

Por todo esto, la intención de esta primera fase es dirigir todo el proceso ACV para garantizar la consecución de los resultados más relevantes⁸⁸.

Para que pueda existir una comparación de datos de entrada y salida se ha de fijar una normalización de la función realizada por el sistema del producto y esta normalización se conoce como unidad funcional y se trata de la unidad a la que van referidas todas las entradas y salidas del sistema, es en concreto el objeto analizado. Es necesario tener como referencia una unidad funcional con objeto de poder comparar los resultados arrojados por el ACV y este análisis comparativo es especialmente crítico a la hora de evaluar diferentes sistemas, por ello la necesidad de seleccionar la unidad funcional como unidad común a todos ellos. Para cuantificar la unidad se ha de determinar el flujo de referencia que se define como la cantidad de producto necesario para que la unidad funcional cumpla su función.

1.5.2.2.- Análisis de Inventario

El análisis de inventario es la segunda fase o paso de un ACV y es el proceso resultante de la recopilación de datos relacionados con el medio ambiente, sus respectivas cantidades de los procesos unitarios relacionados dentro de los límites de estudio que componen el sistema productivo y el cálculo para la cuantificación de entradas y salidas de un sistema de producto junto con la verificación de los datos aportados.

Los datos considerados han de estar directamente relacionados con la unidad funcional elegida en la primera fase (Objetivo y Alcance).

⁸⁸ ISO 14041:1998, *Environmental Management – Life cycle assessment. Goal and scope definition and Inventory analysis*. International Organization for Standardization.

En el análisis de inventario se han de incluir las fuentes de carbón fósil y biogénico teniendo en cuenta que el balance de CO₂ captado y emitido por la biomasa es cero y que han de incluirse todos los procesos del ciclo de vida de la biomasa incluyendo su cultivo y producción. El aporte de electricidad ha de incluir las emisiones, construcción y mantenimiento del sistema de distribución.

Los resultados que se derivan de un inventario proporcionan el ICV o Inventario del Ciclo de Vida que aporta información acerca de los flujos elementales de entradas y salidas, desde el medio ambiente y hacia él, de todos los procesos unitarios intervinientes en el estudio.

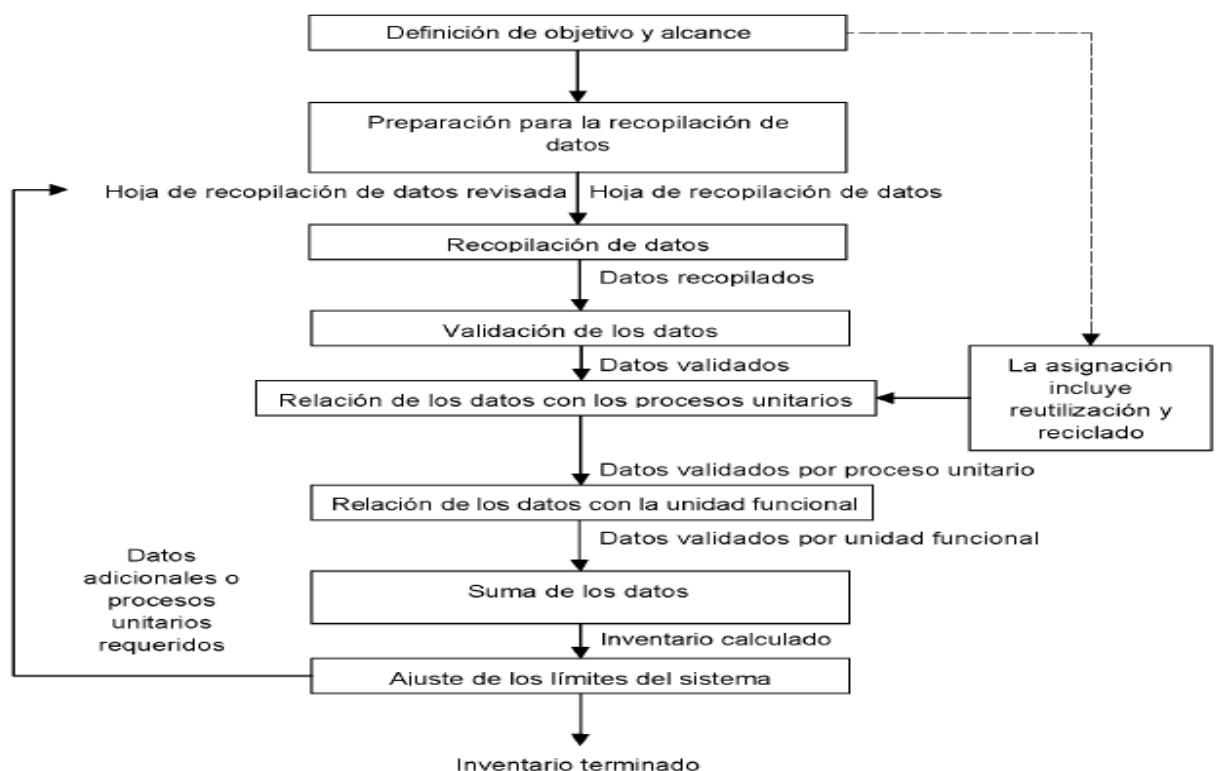


Gráfico 1.4: Procedimientos simplificados para el análisis de inventario

Fuente: ISO 14044

La recopilación de datos, fijados los límites del sistema, para cada proceso unitario corresponden a entradas de energía, materias primas etc., productos, subproductos y residuos, emisiones al aire y al terreno. Los procedimientos de cálculo a partir de la recopilación de datos incluyen la validación de esos datos, la relación de datos en los procesos unitarios y la relación de los datos en el flujo de referencia de la unidad funcional.

Para el cálculo de los flujos de referencia se han de tener en cuenta los combustibles y fuentes de energía eléctrica extra, así como la eficiencia en la conversión y las entradas y salidas asociadas a la generación y el uso de ese flujo de energía.

1.5.2.3.- Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

En esta fase de un ACV y según la norma ISO 14044, se interpreta y transforman en indicadores de impacto, la relación de materiales y cantidades de energía consumida del producto o sistema estudiado, en el inventario del ciclo de vida.

Mediante el análisis de impacto del ciclo de vida se calcula el impacto potencial del cambio climático de cada una de las emisiones y captura de gases de efecto invernadero del sistema de producto de tal forma que, según el informe IPCC, se multiplica la masa del gas de efecto invernadero, emitido o capturado, por el factor de calentamiento global a 100 años en unidades de Kg CO_{2equiv}.

Los indicadores de impacto reflejan la contribución de las diferentes categorías de impacto, a la carga ambiental. Estos indicadores son concluyentes debido a una serie de medidas recomendadas por la norma ISO 14042⁸⁹ que toma como pasos obligatorios la definición y clasificación de las categorías de impacto y la caracterización y como pasos opcionales la normalización y ponderación.

Las categorías de impacto son las responsables de especificar los impactos debidos a las emisiones y consumo de recursos naturales provocados por la fabricación, el uso y la eliminación del producto considerado.

⁸⁹ ISO 14042:2000, Environmental Management – “*Life Cycle Assessment. Life cycle Impact assessment*”. international organization for Standardization (ISO).

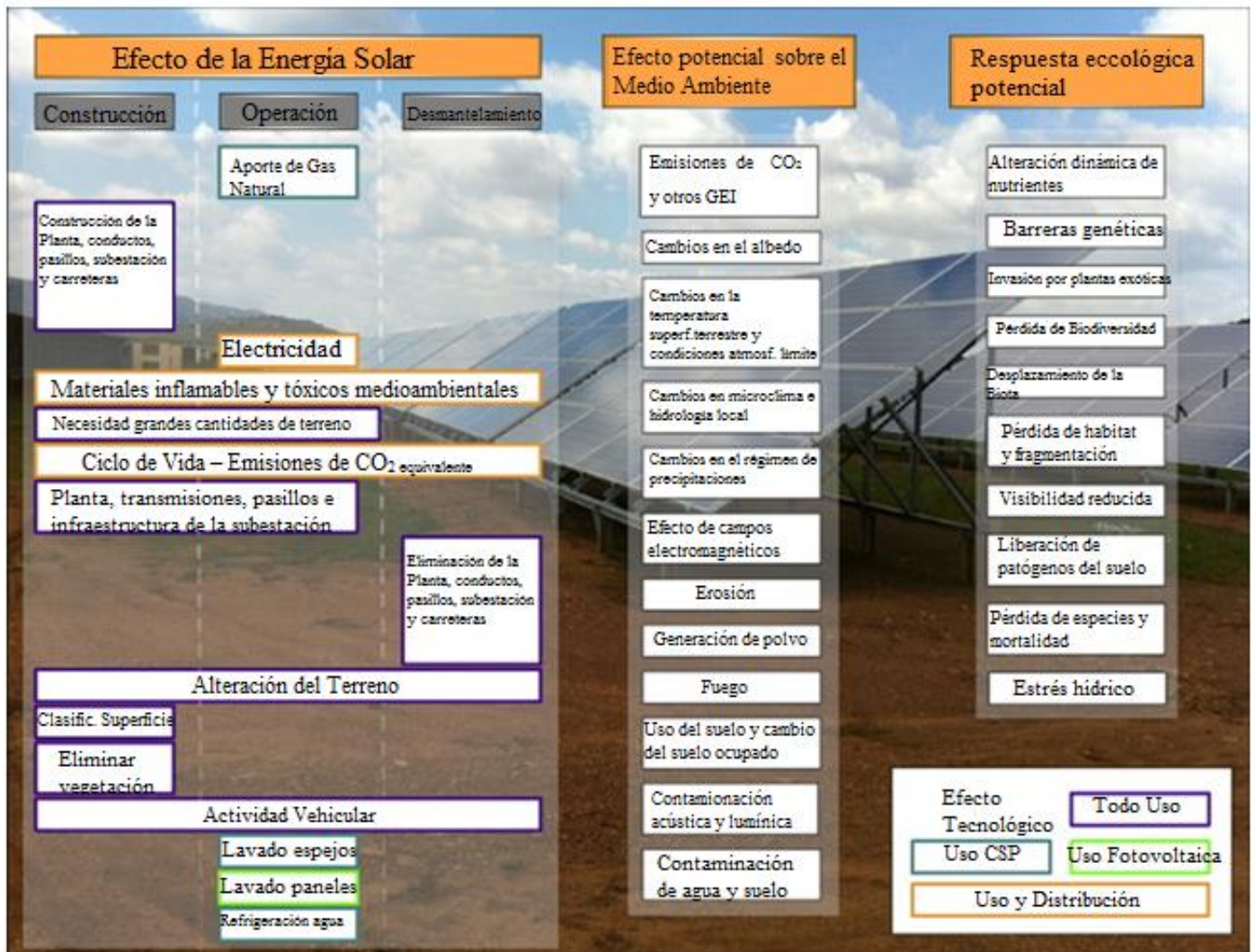


Figura 1.22: Lista completa de los impactos ambientales de una planta CSP.

Fuente: Hernández R.R., "global aridland ecology and sustainability"

A continuación, se describe con más precisión, los diferentes modelos de impacto mencionados:

* **Clasificación:**

En esta primera fase llamada clasificación es donde se asignan los datos introducidos en el inventario para cada una de las diferentes categorías de impacto en forma de emisiones de gases de efecto invernadero, CO₂, CH₄, etc.

* **Caracterización:**

Una vez seleccionadas las categorías de impacto de los indicadores de categoría y de los modelos de caracterización, se pasa a una clasificación mediante la cual se asignan los datos de inventario con cada categoría de impacto y con los indicadores de categoría, aunque no todos los resultados del inventario tiene cabida en alguna categoría de impacto,

sí todas las categorías de impacto utilizan algún elemento del inventario; por ello existe una desigualdad entre la determinación del inventario y el impacto, inevitable⁹⁰, ya que son dos etapas independientes y el método de cálculo de impacto varía según las categorías seleccionadas y el método de caracterización.

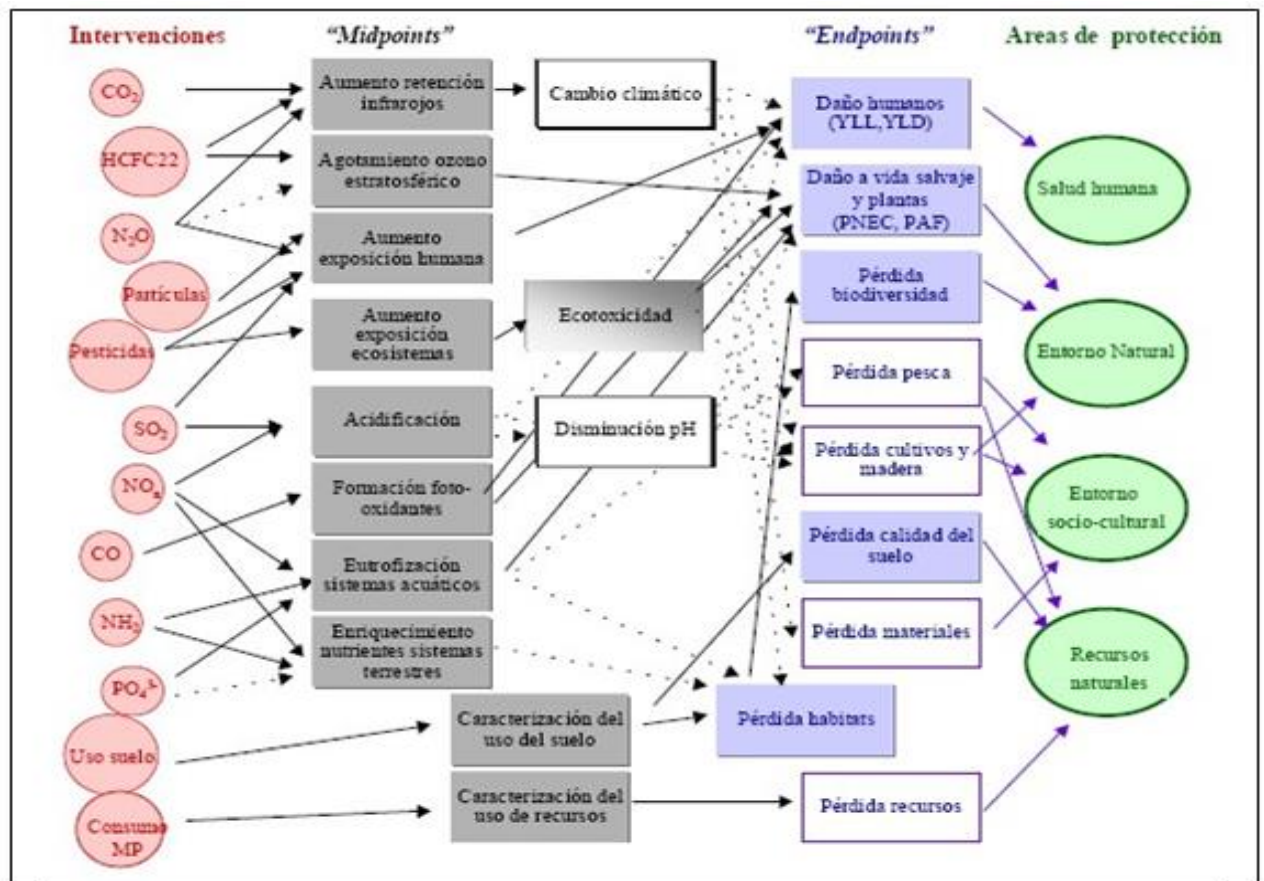


Gráfico 1.5: Diagrama general para un modelo de caracterización.
Fuente: UNEP

En el Gráfico 1.5 correspondiente a un modelo general de caracterización se aprecia que las partes de color rojo corresponden a las emisiones, que se asignan a determinados daños ecológicos.

Como último paso, mediante la caracterización, se obtienen los indicadores de categoría. Los factores de caracterización se obtienen mediante el uso de modelos cuantitativos basados en análisis científico de cada proceso medioambiental.

⁹⁰ Goedkoop M. and Oele M., “*SimaPro 6. Introducción at ACV*”, PRéConsultant, Holland. 2004.

El cálculo de los indicadores se realiza mediante el producto de los resultados obtenidos en la fase de clasificación del inventario y los factores de caracterización de cada sustancia dentro de cada categoría de impacto que expresan la contribución de la misión de una unidad de masa, al medio ambiente.

*** Normalización:**

La normalización incorpora los resultados de los indicadores de impacto obtenidos en la caracterización permitiendo la comparación de dichos indicadores de impacto, entre ellos de manera que la suma del resultado de la categoría de cada indicador se divide por un valor de referencia.

Los factores de normalización se seleccionan para representar la medida potencial de la categoría de impacto correspondiente a determinada zona geográfica en determinado tiempo. La normalización suele ser útil para detectar inconsistencias, pero presenta el obstáculo tiene la contrapartida de la eventualidad geográfica y temporal.

*** Ponderación:**

Mediante la ponderación se consigue la transformación de los resultados obtenidos para los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto, en otros coeficientes o factores numéricos basados en estimaciones parciales de tal forma que su dependencia puede deberse a factores políticos, sociales, etc.

La ponderación se obtiene mediante el producto de los diferentes factores por el resultado obtenido de la normalización para cada categoría de impacto. Los factores de ponderación son variables en cuanto a la zona geográfica basándose en criterios sociales y políticos.

La diferencia entre ponderación y normalización es que ésta aporta una base para la comparación de los diferentes tipos de categorías de impacto ambiental mientras que la ponderación asigna valores relativos a las diferentes categorías de impacto en función de su relevancia⁹¹.

De todos estos modelos se derivan las diferentes categorías de impacto de mayor peso en esta tesis y que se describen seguidamente:

⁹¹ ENLSIC buildings, “Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings”, <http://circe.cps.unizar.es/>.

- Agotamiento de los recursos abióticos: El origen de los bienes materiales se encuentra en la naturaleza y los recursos no renovables son los que se renuevan lentamente mediante ciclos naturales como es el caso de los combustibles fósiles o los que no lo hacen de forma natural como los depósitos minerales. El agotamiento de este tipo de recursos se debe en gran medida al crecimiento de la población, al consumo individual y a la mala gestión de ellos. Mediante el Análisis de Ciclo de Vida se valora el efecto parcial del uso de los anteriores recursos, valorando su carencia y la perspectiva de agotamiento. Visto esto, la importancia ambiental del consumo de un producto es inversamente proporcional a su abundancia y directamente proporcional a su explotación.

Resumiendo, se define como la disponibilidad de los recursos naturales incluyendo la energía y que responde a la siguiente fórmula matemática:

$$AR = \sum F_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.1]}$$

AR: Indicador de agotamiento de Recursos Abióticos

m_i: Masa de recurso utilizado (expresado en kg/m³)

F_i: Factor de Caracterización del recurso

Algunos autores⁹², y para un caso concreto de determinado producto, recomiendan la incorporación del factor reducción del recurso calculado mediante el factor de agotamiento abiótico, ADF expresado en kg_{eq} de sustancia_i/kg, mediante la expresión:

$$AR = \sum ADF_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.2]}$$

- Uso del Suelo: El uso del suelo es una de las categorías de mayor peso en cuanto a la sostenibilidad de una función y no existe consenso acerca del tipo de indicadores aplicables a él y por ello los indicadores más desarrollados en este sentido, guardan relación con la biodiversidad. También se ha considerado el establecimiento de indicadores específicos para la evaluación del cambio en la calidad del suelo que podrían ser incidentes sobre la sostenibilidad de la vida en la zona asignada para la central, y en menor medida los ciclos hidrológicos⁹³.

⁹² Guinée J.B. “Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products; with a case study on margarines”, Thesis, Leiden University, Leiden, Netherland, 1995.

⁹³ Weidema B., Lindeijer E. “Physical impacts of land use in product life cycle assessment. Final report of the EURENVIRON-LCAGAPS sub-project on land use”. Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark. 2001.

La principal evaluación de esta categoría, se refiere a la ocupación del terreno y que genera un impacto al que se llama IS que se corresponde con la cantidad de terreno usado, medido en m² en relación con el ciclo de vida de producto o sistema de procesos. Su cálculo se realiza sin tener en cuenta las distintas formas de uso ni el estado inicial del terreno⁹⁴.

- *Cambio Climático*: Debido a la absorción de la radiación solar por parte de la tierra y esta, en forma de energía, se dispersa por la atmósfera y los océanos volviendo en forma de radiación infrarroja térmica y parte de ella se absorbe en los gases atmosféricos, vapor de agua, metano, óxidos de di-nitrógeno, dióxido de carbono y CFC provocando el efecto invernadero afectando a la salud humana, el ambiente natural y el modificado por el hombre. Se toma el CO₂ como la referencia tipo para el efecto invernadero y el impacto de las diferentes sustancias que afectan al calentamiento global es valorada en función de la capacidad de absorber e irradiar el calor del planeta en relación con la capacidad radiactiva del CO₂. Se trata de una difícil determinación debido a la vida media de los gases en la atmósfera, así como las posibles reacciones químicas directas e indirectas entre gases que modifican su duración. Según el protocolo de Kioto “*Los potenciales de calentamiento global usados por los firmantes serán los proporcionados por el IPPC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático mediante un horizonte temporal de 100 años)*”.

Para valorar este impacto se utiliza el llamado Climate Change Indicator o CCI y mide el efecto producido por 1 kg. de CO₂ a través de la siguiente ecuación:

$$CCI = \sum_i GWP_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.3]}$$

m_i : Masa de la sustancia i en Kg.

GWP : Potencial de calentamiento global.

El potencial de calentamiento global es la relación entre la contribución a la absorción de calor resultante de la emisión de 1 Kg de gas de efecto invernadero y la emisión equivalente de CO₂ durante un período definido en años. Los valores GWP se

⁹⁴ Weidema B.P., Mortensen B., Nielsen P., Hauschild M. “*Elements of an Impact Assessment of Wheat Production*”. Institute for Product Development. 1996.

publican periódicamente por el organismo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

- Agotamiento de la capa de Ozono: La capa de ozono, situada en las capas altas de la atmósfera o estratosfera, es la responsable de la absorción de la radiación UV y su disminución conduce a un aumento de la radiación UV-b causante de diversas enfermedades en el ser humano, disminución en la producción agrícola y degradación en algunos materiales como pueden ser los polímeros. Todo esto lleva al incremento en los impactos relacionados con la salud humana, el entorno natural y los recursos naturales.

El agotamiento de la capa de ozono se debe a la reacción, entre las emisiones de Cl^- y Br^- procedentes de los compuestos fluorocarbonados, con los gases que se encuentran en las nubes estratosféricas y catalizado por los rayos ultravioleta.

Según algunos autores⁹⁵, el ODI o indicador de agotamiento de la capa de ozono se calcula como el producto de la suma de los potenciales de agotamiento de ozono para diferentes sustancias y la masa en kilogramos de cada una de ellas, expresado en 1 Kg de efecto de CFC-11. La expresión correspondiente a este indicador se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CDI = \sum_i ODP_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.4]}$$

ODP: Relación entre la descomposición del ozono en el estado de equilibrio, debido a las emisiones anuales en Kg^{-1} de una cantidad de sustancia i emitida a la atmósfera y la misma descomposición del ozono de una cantidad igual de CFC-11.

- Formación de Niebla fotoquímica: Se debe, principalmente, a la reacción de los diferentes óxidos de nitrógeno (NO_x) con compuestos orgánicos volátiles para generar O_3 troposférico, al igual que sucede con la presencia de CO, generalmente en los meses del año más calurosos y se trata de agentes que afectan a las áreas de protección: salud humana, recursos naturales, entorno natural y el modificado por la actividad humana⁹⁶.

⁹⁵ Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R. and Huijbregts M.A.J. "Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland. 2002.

⁹⁶ Udo de Haes H.A., Joliet O., Finnveden G., Huaschild M., Muller-Wenk R. "Best available practice regarding impact categories and category indicators in LCA (II)". International Journal of LCA, N°4, 1999.

Para el cálculo del indicador para la formación de oxidantes fotoquímicos (POI) se utiliza como factor de caracterización el potencial de generación de ozono fotoquímico y se cuantifica respecto al efecto producido por 1 Kg. de etileno.

El cálculo de este indicador viene dado por la expresión:

$$POI = \sum_i POCP_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.5]}$$

Siendo POCP la relación existente entre el cambio en la concentración de O₃ debido a un cambio en la emisión de volátiles orgánicos y el mismo cambio en la concentración de O₃ a un cambio en la emisión de etileno⁹⁷.

Los diferentes óxidos de nitrógeno actúan como catalizadores en la reacción química y no se consumen, pero dependiendo de la concentración de estos óxidos, la generación de agentes fotooxidantes se verá alterada. La aparición de óxidos de nitrógeno se ve influenciada por el tipo de industria, las infraestructuras y el transporte.

- Acidificación: La acidificación es el fenómeno resultante de la deposición de ácidos resultantes de la liberación de NO_x y S⁻ a la atmósfera, suelo y agua, en los que puede verse modificada la acidez con el efecto que se deriva a la flora y fauna provocando la deforestación y ataque a los diferentes materiales de construcción. Las áreas de protección son la salud humana, los recursos naturales, el entorno natural y la actividad humana.

El cálculo del indicador para esta categoría se realiza mediante la siguiente expresión:

$$AI = \sum_i AP_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.6]}$$

AP: Potencial de acidificación expresado en gr_{equiv}.

El potencial de acidificación para determinada sustancia se obtiene mediante la relación entre el potencial de H⁺_{equiv.} que desprende esa sustancia. Las emisiones de las diferentes sustancias se pueden sumar en función de los protones que puedan aportar. Los compuestos causantes de la acidificación son, principalmente, SO₂, NO_x y NH₃.

⁹⁷ Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R. and Huijbregts M.A.J. "Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland. 2002.

Esta categoría de impacto, adquiere especial relevancia en función del área geográfica de tal manera que una elevada mineralización y una alta desnitrificación reducen la contribución de los compuestos acidificantes. La existencia de sustancias con aniones que acompañan a los H^+ reducirán el aporte de estos, como es el caso de los NO_x y el amoníaco.

- *Eutrofización*: Se trata de un fenómeno que aparece como consecuencia del aumento de nutrientes, en entornos acuáticos, por diferentes vías (aguas residuales domésticas e industriales), fundamentalmente de las diferentes fracciones de N y P. A causa de esto, se integran sus impactos en esta categoría de tal forma que la proliferación de algas en el medio acuático, conduce a un descenso en la concentración de O_2 debido a su consumo por la descomposición de ellas, viéndose favorecido en los meses de mayor radiación solar. Este proceso se mide como demanda bioquímica de oxígeno o DBO y su elevado valor es indicativo de determinadas condiciones anaerobias provocadas por bacterias que al provocar la descomposición liberan metano, ácido sulfhídrico y amoníaco.

Las áreas de protección que involucra este proceso son el entorno natural, la actividad humana y los recursos naturales⁹⁸.

La medida de esta categoría de impacto se efectúa mediante la cantidad de oxígeno medido por la cantidad existente de nitrógeno y fósforo para su conocimiento en cuanto a contribución potencial a la formación de biomasa⁹⁹.

Para el cálculo total del indicador correspondiente a esta categoría se utilizan los potenciales de eutrofización o EP y el cálculo de este indicador se realiza mediante la expresión:

$$EI = \sum_i EP_i \times m_i \text{ [Ecuación 1.7]}$$

m_i : Masa de determinada sustancia emitida al medio (en Kg.)

EP_i : Potencial de eutrofización de determinada sustancia (en gr.equiv PO_4 /gr)

⁹⁸ Udo de Haes H.A, Joliet O., Finnveden G., Huaschild M., Muller-Wenk R. “Best available practice regarding impact categories and category indicators in LCA (II)”. International Journal of LCA, N°4(3). 1999.

⁹⁹ Guinée J. B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A.A.H., Weidema B. P.: “Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards”; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Netherland, 2001.

- Ecotoxicidad: En la mayoría de los procesos industriales existen sustancias tóxicas incidentes tanto en la salud humana como en el ecosistema que aún en pequeña concentración, pueden llegar a tener una elevada acumulación con el tiempo como puede ser el caso de los metales pesados. La emisión de partículas y radiaciones pueden generar este tipo de daños.

Mediante esta categoría se evalúan los efectos de las sustancias tóxicas existentes en el medio ambiente, sobre los medios acuático, terrestre y salud humana. Las áreas de protección sobre las que influye son las correspondientes a la salud humana, el entorno natural y los recursos naturales tratándose de la categoría sobre la que más influye el transporte a través de diferentes medios, ya que un contaminante tiene tendencia a desplazarse hacia otros lugares que serán contaminados pudiendo ser más dañinos allí dónde han sido desplazados.

El cálculo de este indicador para los diferentes medios se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$HTI = \sum_n \sum_i HTP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \text{ Ecotoxicidad Humana [Ecuación 1.8]}$$

$$ATI = \sum_n \sum_i ATP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \text{ Ecotoxicidad Acuática [Ecuación 1.9]}$$

$$TTI = \sum_n \sum_i TTP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \text{ Ecotoxicidad Terrestre [Ecuación 1.10]}$$

HTP: Factor de caracterización de la salud humana dependiente del método utilizado (unidades dependientes, por tanto, del método empleado).

ATP: Factor de caracterización en ecosistema acuático.

TTP: Factor de caracterización en ecosistema terrestre.

$f_{i,n}$: Porción de sustancia i , transportada desde el foco a otra zona.

n : Número adimensional.

m_i : Masa emitida del contaminante i .

- Energía Consumida: Referida a un determinado material o proceso relativa al ciclo de vida de ellos. Están incluidas las materias primas, el proceso de fabricación, el transporte, su uso y su tratamiento final como residuo. El consumo total de energía es un componente de gran importancia en el impacto del ciclo de vida.

- Generación de Residuos sólidos y líquidos: La finalidad de esta categoría de impacto es la valorización de las cantidades de residuos generadas por las actividades participantes

en el ciclo de vida que se pretende realizar, distinguiendo entre residuos líquidos y sólidos.

- *Emisiones de Metales Pesados*: La presencia de materiales pesados en altas concentraciones presenta efectos nocivos sobre los seres vivos. Es una categoría de impacto ligada a la ecotoxicidad, aunque su cálculo es más directo y las principales sustancias implicadas son el Cr, V, Cd, Mo, Mn, K y Na.

1.5.2.4.- Interpretación de Resultados

Basándose en la norma ISO 14043, en este paso se interpretan los resultados obtenidos mediante la evaluación de impacto para posteriormente proceder a la toma de decisiones y la definición de las cuestiones críticas para el medio ambiente, así como la contribución de los componentes de un determinado producto o la carga ambiental de determinados procesos.

La justificación de los resultados se puede hacer desde tres puntos de vista¹⁰⁰:

Integridad del estudio para confirmar que los aspectos ambientales relevantes identificados anteriormente como relevantes, interpretan adecuadamente, la información de los pasos del ACV de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

Sensibilidad para verificar si los resultados y conclusiones pudieran verse afectados por los métodos de evaluación elegidos o la incertidumbre de los datos. El análisis de incertidumbre permite estudiar la variación estadística de los datos de entrada y salida de los procesos unitarios para determinar si los resultados de los indicadores de la misma categoría de impacto pudieran verse influidos por esas variaciones y si ellos confluyen en resultados similares.

En realidad, se trata de conseguir un grado de certidumbre para los resultados del estudio en relación con el objetivo principal.

Coherencia mediante la evaluación de la coherencia de los métodos, procedimientos y el manejo de los datos empleados en el estudio, con el objetivo y alcance del estudio. Esta

¹⁰⁰ *ILCD handbook: General guide for life cycle assessment – detailed guidance, first edition, Institute for Environment and Sustainability. 2010.*

evaluación se puede hacer sobre las bases de datos, su precisión y las suposiciones y límites del sistema.

1.5.2.5.- Métodos de evaluación en un ACV

Entre las metodologías de un análisis de impacto del ciclo de vida existen distintos enfoques como pueden ser el modelado, factores de caracterización, categorías de impacto etc. de tal manera que cada una de las metodologías, llevan a diferentes resultados para un mismo sistema en estudio, por eso, es muy conveniente el empleo de diferentes métodos de análisis de impacto para la evaluación de los perfiles ambientales de los diferentes sistemas y esto aportar, desde diferentes puntos de vista, la intervención ambiental de los sistemas.

En todas las metodologías empleadas, se obtiene los resultados finales teniendo en cuenta la caracterización, normalización y ponderación que conducen a una serie de indicadores que se representan por puntos que expresan la gravedad en cuanto a la contribución de las diferentes categorías de impacto a la carga ambiental, a mayor número de puntos, mayor es la carga ambiental de ese producto o sistema

Existen, principalmente, dos tipos de métodos en un ACV que corresponden a la evaluación en el aspecto ambiental y en el aspecto energético.

Método de evaluación desde el punto de vista ambiental: Se trata de un método basado en el análisis de impacto del ciclo de vida con diferencias entre unos y otros:

- *Desde una perspectiva del modelo, punto medio, punto final o medio y combinaciones de ellos.*
- *En función de las categorías de impacto de cada metodología, categorías de punto medio y punto final.*
- *En función de los factores de caracterización, normalización y ponderación.*
- *De acuerdo a los productos que contenga cada metodología.*
- *En función de la validez en la zona de aplicación.*
- *En función de la vigencia del modelado del perfil ambiental.*

De las metodologías LCI existentes, las más reconocidas son las siguientes:

- Protocolo GHG
- CML-IA¹⁰¹
- EDIP 2003¹⁰² (Environmental Design of Industrial Products).
- TRACI¹⁰³ (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts)
- EI99¹⁰⁴ (Eco Indicator 99). Metodología bajo la perspectiva jerárquica
- EPS 2000¹⁰⁵ (Environmental Priority Strategies in product design). Metodología desde la perspectiva jerárquica.
- Ecological Scarcity 2013¹⁰⁶.
- ReCiPe Midpoint y Endpoint¹⁰⁷. Actualiza el Ecoindicador. Metodología desde la perspectiva jerárquica
- Impact 2002+¹⁰⁸. Metodología desde la perspectiva jerárquica
- MEEup¹⁰⁹ (Method for the Evaluation of Energy using Products).
- BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)¹¹⁰.
- Ecological Footprint¹¹¹.

¹⁰¹ Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J. “*Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective*”. Ila y Iib: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, pág.692, 2002.

¹⁰² Environmental Protection Agency (EPA) “*Background for spatial differentiation in life cycle impact assessment: The EDIP2003 methodology*”, USA, 1994.

¹⁰³ Bare J.C., Norris G.A., Pennington D.W., McKone T., “*TRACI, the Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*”, Journal of Industrial Ecology, Volume 6, Nº 3–4, pág.49-77, 2003.

¹⁰⁴ PréConsultants (Product Ecology consultants), PRé Sustainability, PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands, [http:// www.pre.nl](http://www.pre.nl)

¹⁰⁵ Steen B., “*A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)*”, V. 2000 – General system characteristics, CPM report 1999:5.

¹⁰⁶ Frischknecht R., Steiner R., Arthur B., Norbert E., Gabi H., “*Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006 the international Conference on EcoBalance*”, Tsukuba, Japan, November, 2006.

¹⁰⁷ Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R., ReCiPe 2008, “*A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint. and the endpoint. level*”: First edition, Report I: Characterization., Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), Netherland, 2009.

¹⁰⁸ Goedkoop M., Oele M., de Schryver A., Vieira M., *SimaPro Database Manual, Methods library*, v2.2, PRéConsultants, Netherland. 2008.

¹⁰⁹ European Commission. “*Methodology study Eco design of energy using products, MEEup methodology report*”, 2005.

¹¹⁰ American Society for Testing and Materials (ASTM) “*Standard Practice for applying the Analytic Hierarchy Process to Multi Attribute Decision Analysis (MADA) of investments related to buildings and building systems*”, ASTM designation E 1765-95, West Conshohocken, PA, USA. 1995.

¹¹¹ Wackernagel M., “*Ecological Footprint. and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Toward Sustainability*”. Dissertation, School of Community and Regional Planning, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1994.

- USEtox¹¹². Indicador único
- ILCD
- EDP¹¹³ (The Ecosystem Damage Potential).
- IPCC 2013 a 100 años (Intergovernmental Panel on Climate Change). Indicador único, para el cálculo de la huella de carbono.

De entre ellos, los más representativos se describen a continuación:

- **Protocolo GHG¹¹⁴**

Es un método basado en el informe de un proyecto sobre la contabilidad del ciclo de vida de un producto. Corresponde al protocolo de gases de efecto invernadero y fue desarrollado por el WRI (Instituto de Recursos Mundiales) y el WBCSD (Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible) y supone un modelo estándar de administración en las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la caracterización de este método, el cálculo de los equivalentes de CO₂ para los gases distintos a él, se ha de informar de los daños potenciales del IPCC hacia el calentamiento global, de los últimos 100 años. El potencial calentamiento global o GWP, a 100 años, es una medida utilizada para expresar las características de radiación de tiempo integrado, por el efecto de los gases de efecto invernadero, a una perspectiva de 100 años. Las emisiones totales de estos gases se calculan mediante inventariado de productos sumando las emisiones de cada uno de ellos en unidades de CO₂-eq por los diferentes procesos de primer o segundo plano y dentro de los límites del sistema. Así, se hace la siguiente distinción:

- *Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de combustibles fósiles.*
- *Emisiones de carbono biogénico.*
- *Almacenamiento de carbono.*
- *Emisiones procedentes de la transformación de la tierra.*

¹¹² Hauschild M.Z., Huijbregts M., Jolliet O., McLeod M., Margin M., Van De Meent D., Rosenbaum R.K., Mckone T.E., “Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony” Environmental Science and Technology, N°42, pág.7032-7037, 2008.

¹¹³ Koellner T. and Scholz R.W. “Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment, Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change”, The international Journal of LCA N°12(1) pág.16-23, 2007.

¹¹⁴ WBCSD and WRI. 2009. “Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard”. Review Draft for Stakeholder Advisory Group. The Greenhouse Gas Protocol Initiative. 2009.

El informe de las cantidades aportadas por los productos fósiles y las emisiones biogénicas se dan de forma independiente y las notificaciones sobre las emisiones por almacenamiento de carbono y la transformación de la tierra es opcional.

La normalización y ponderación, no forman parte de este método.

• CML-IA

Este método fue elaborado en el año 2001 por unos científicos de la Universidad de Leiden proponiendo una serie de categorías de impacto y métodos de caracterización para la etapa de evaluación de impacto implementada como metodología para el enfoque del punto medio, hay proceso de normalización, pero no ponderación. En Sima Pro existen dos versiones, una “*baseline*” con 10 categorías de impacto y una versión extendida, con todas las categorías de impacto. La versión de este método que ha sido utilizada para este estudio, ha sido actualizada desde el sitio web de la universidad de Leiden.

Para la clasificación y caracterización, la guía de este método expone una lista categorías de impacto y proporciona directrices para la inclusión de otros métodos e indicadores de categoría de impacto en el caso de estudios detallados estando agrupados en¹¹⁵:

- Categorías de impacto obligatorias: indicadores de categoría utilizados en la mayoría de los Análisis de Ciclo de Vida. Si existieran varios métodos para esta categoría, se selecciona un indicador “*baseline*”, para estudios simplificados, basado en el principio de mejores prácticas disponibles, siendo indicadores de referencia de punto medio
- Categorías de impacto opcionales: existencia de indicadores operativos, no incluidos frecuentemente en los Análisis de Ciclo de Vida.
- Otras Categorías de impacto: No existe disponibilidad de indicadores operativos y por tanto no hay posibilidad de reflejar resultado cuantitativamente.

Las categorías de daños ambientales para esta categoría son las siguientes:

- *Agotamiento de Recursos Abióticos*
- *Cambio Climático*

¹¹⁵ Guinée J.B, Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., Van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., De Bruijn, H., Van Duin R., Huijbregts M.A.J. “*Handbook on Life Cycle Assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background*”. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, pág.692, 2002.

- *Agotamiento de la capa de Ozono*
- *Ecotoxicidad Humana*
- *Ecotoxicidad de Agua Dulce*
- *Ecotoxicidad Marina*
- *Ecotoxicidad Terrestre*
- *Formación de Foto-oxidantes*
- *Acidificación*
- *Eutrofización*

Para la versión ampliada, aparte de las anteriores, también se tienen en cuenta:

- *Calentamiento Global*
- *Límite superior del calentamiento global neto*
- *Límite inferior del calentamiento global neto*
- *Ecotoxicidad de los sedimentos marinos*
- *Media europea de $kg_{equiv} NO_x$ y promedio europeo de $kg_{equiv} SO_2$*
- *Competencia del suelo*
- *Radiación Ionizante*
- *Oxidación fotoquímica*
- *Contaminación Odorífera*
- *Incremento en la reactividad beneficiosa*
- *Máximo incremento de la reactividad y en la reactividad del ozono*

En un ACV simplificado se considera el proceso de normalización como algo opcional pero obligatorio si se trata de un ACV detallado, considerando puntuaciones de normalización para cada indicador de *baseline*, calculados para situaciones referenciadas a determinada zona y año¹¹⁶.

• **Ecological Scarcity 2013:**

También conocido como método de Eco puntos y se basa en el Ecological Scarcity del 2006 y 1997 (Eco puntos 97). Este método mide de entre los impactos ambientales, las emisiones contaminantes y el consumo de recursos mediante la aplicación de “eco factores” que se derivan de la legislación ambiental u objetivos políticos. Los grados de emisiones y consumo de recursos más recientes pueden exceder el objetivo de protección medioambiental, los eco factores tomarán valores elevados y se expresarán en eco-puntos.

El eco factor, y de acuerdo con la norma ISO 14044, se deriva de los elementos de caracterización, normalización y ponderación.

¹¹⁶ Huijbregts M.A.J., Breedveld L., Huppes G., De Koning A., Van Oers L., Suh S. “Normalization figures for environmental lifecycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the World (1990 and 1995)”. Journal of Cleaner Production N°11(7), pág.737-748, 2003.

Los cambios, más importantes, incorporados a este método son los siguientes:

- *Se ha fijado un objetivo de reducción de CO₂ y gases de efecto invernadero del 80%.*
- *Evaluación energética interpolada al marco establecido pasando de 2000W per cápita a 2035W.*
- *Incorporación, como contaminantes del aire, eco factores procedentes de PAHs e isótopos radiactivos.*
- *Incorporación a PAHs de dioxinas, furanos y benceno por su potencial carcinogénico.*
- *Incorporación de eco factores adicionales para emisiones al acuáticas como el petróleo sobre la base de un acuerdo internacional de protección del Mar del Norte. También, se incorporan por primera vez, eco factores para las emisiones e isótopos radiactivos y contaminantes orgánicos en los cursos acuíferos.*
- *Incorporación de eco factores globalizados para el agua dulce como recurso escaso. Recomendándose que el eco factor para el agua dulce se aplique para el agua de consumo y no la de extracción.*
- *Nuevo eco factor para los recursos minerales primarios. Se utiliza como base para la caracterización, la proporción anula de las reservas disponibles.*
- *Nuevos eco factores para la categoría de daño ambiental de uso de la tierra. La caracterización está basada en los impactos provocados sobre la biodiversidad de plantas y animales por el uso del terreno.*
- *Incorporación de nuevos eco factores para la contaminación acústica debida al transporte por carretera, vías ferroviarias y aéreas.*

Mediante este método, la caracterización se puede aplicar cuando el impacto ambiental correspondiente tuvo un papel clave en la definición del objetivo. Dado que las leyes actuales de emisiones de CO₂, se acuerda tener en cuenta todos los gases de efecto invernadero y así poder utilizar valores del potencial de calentamiento atmosférico. La caracterización no es apropiada en los casos en que el impacto ambiental, asignado a ella, no coincide con la intención legislativa en cuanto al objetivo de reducción. La implementación de la base de datos Ecoinvent incorpora 19 categorías de impacto específicas con puntos de carga del medio ambiente, con respecto a cada sustancia.

• **Eco indicador 99:**

Es un método enfocado al punto final desarrollado en Holanda por la organización Pre¹¹⁷ a través de las bases de datos de otras organizaciones de gran relevancia que fue desarrollada y mejorada finalmente en el año 1999 mediante una mejor base científica para los modelos de daños, desembocando, en ese año, con el nombre de Eco indicador 99 con una extensa lista de indicadores¹¹⁸ y metodología mejorada para el cálculo de los mismos.

Las categorías de daños ambientales incluidas en esta metodología son las siguientes:

- *Cambio climático*
- *Agotamiento de la capa de ozono*
- *Acidificación*
- *Eutrofización*
- *Efectos sobre las vías respiratorias*
- *Carcinogénicos*
- *Radiación ionizante*
- *Ecotoxicidad*
- *Uso del terreno*
- *Recursos minerales*
- *Recursos fósiles*

Estas categorías se agrupan en 3 áreas que se corresponden con:

- *Calidad del ecosistema*
- *Salud humana*
- *Recursos naturales*

Los valores correspondientes a la caracterización y normalización se llevan a cabo utilizando los datos de extracción y emisiones a la atmósfera, de recursos recogidos en un estudio previo para el desarrollo de esos valores para el territorio europeo y se basan en las actualizaciones ambientales resultantes del período comprendido entre los años 1990 hasta 1994. Los valores correspondientes a la ponderación se realizan mediante una aproximación del cuadro general de tres áreas protegidas y se diferencia de otras metodologías en las que a la ponderación se le asignan más de 10 categorías de impacto

¹¹⁷ PRé Consultants (Product Ecology consultants). PRé Sustainability, PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands

¹¹⁸ Ecoindicator 99, “*Manual for Designers, damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*”, Spatial Planning and the Environment, Netherland, 2000.

en las que los pesos de las áreas protegidas es más simple que la asignación de los pesos de las categorías de impacto que requieren un profundo conocimiento sobre el mecanismo de los efectos, su probabilidad y la manera en que se ocasiona el daño potencial¹¹⁹.

• **EPS 2000:**

Las siglas EPS corresponden a estrategias prioritarias ambientales en el diseño de producto y fue desarrollada en Suecia en el año 1989 como mecanismo para conseguir el cumplimiento de requisitos ambientales eficientes en el desarrollo de productos¹²⁰. Se trata de un método enfocado hacia el punto final y considera las siguientes categorías de daños:

- *Esperanza de vida*
- *Morbilidad y sufrimiento grave*
- *Molestia severa*
- *Capacidad de producción de cultivos molestos*
- *Capacidad de producción de madera*
- *Capacidad de producción de pescado y carne*
- *Capacidad de generar cationes básicos*
- *Capacidad de producción de agua*
- *Participación de las especies en extinción*
- *Agotamiento en las reservas de elementos*
- *Agotamiento de las reservas de fósiles, como el gas, carbón y petróleo*
- *Agotamiento de las reservas minerales*

Se agrupan en 4 áreas:

- *Salud humana*
- *Capacidad de producción ecológica*
- *Biodiversidad*
- *Recursos abióticos*

La caracterización entre categorías de medio ambiente se basa en el principio de precaución mediante tres métodos: el empírico, el método de equivalencia y los métodos mecanicistas en condiciones globales para el año 1990¹²¹.

La normalización no se utiliza en este método y la ponderación se elabora en base a los métodos de monetización o disponibilidad de pago.

¹¹⁹ ILCD handbook: “*Analyzing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment*”, first edition, Institute for Environment and Sustainability, Joint International Research Center, European Commission. 2010.

¹²⁰ EPS methodology (Environmental Priority Strategies in product design), <http://eps.esa.chalmers.se/>

¹²¹ B. Steen, “*A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS)*”, Version 2000 – General system characteristics, CPM report 1999:5.

La validez de las categorías de impacto en esta metodología es global a excepción de la categoría de biodiversidad que se basa en los modelos suecos.

• **IMPACT 2002+:**

Es un método desarrollado por suizos y franceses que combina los modelos de daño del punto medio y el punto final modificada con posterioridad en la evaluación comparativa de algunas categorías de impacto. Esta metodología incorpora como categorías de impacto del punto medio:

- *Toxicidad humana*
- *Efectos sobre las vías respiratorias*
- *Radiación ionizante*
- *Agotamiento de la capa de ozono*
- *Formación de oxidantes fotoquímicos*
- *Ecotoxicidad acuática*
- *Ecotoxicidad terrestre*
- *Eutrofización acuática*
- *Eutrofización terrestre*
- *Acidificación*
- *Uso del suelo*
- *Calentamiento global*
- *Extracción de minerales*

Por el modelo del punto medio, los resultados del inventario se encuentran vinculados a 4 categorías del modelo del punto final que coinciden, para este caso, con las áreas ambientales de protección:

- *Salud humana*
- *Calidad del ecosistema*
- *Cambio climático*
- *Recursos*

Los factores de caracterización se adaptan a los de otras metodologías como Eco indicador 99 y CML y los factores de normalización se apoyan en valores medios europeos como puntos de impacto anuales para un ciudadano medio tipo.

Para esta metodología no existe ponderación, pero de ser necesario, se sugiere la consideración de las cuatro categorías de daños correspondientes a daños a la salud, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos. Para el análisis de diferentes ponderaciones se utiliza el triángulo de ponderación como herramienta de apoyo a las decisiones para el análisis del equilibrio entre las categorías de impacto, representando la

evaluación de la ponderación de los diferentes efectos ambientales en la comparación de diferentes sistemas de productos.

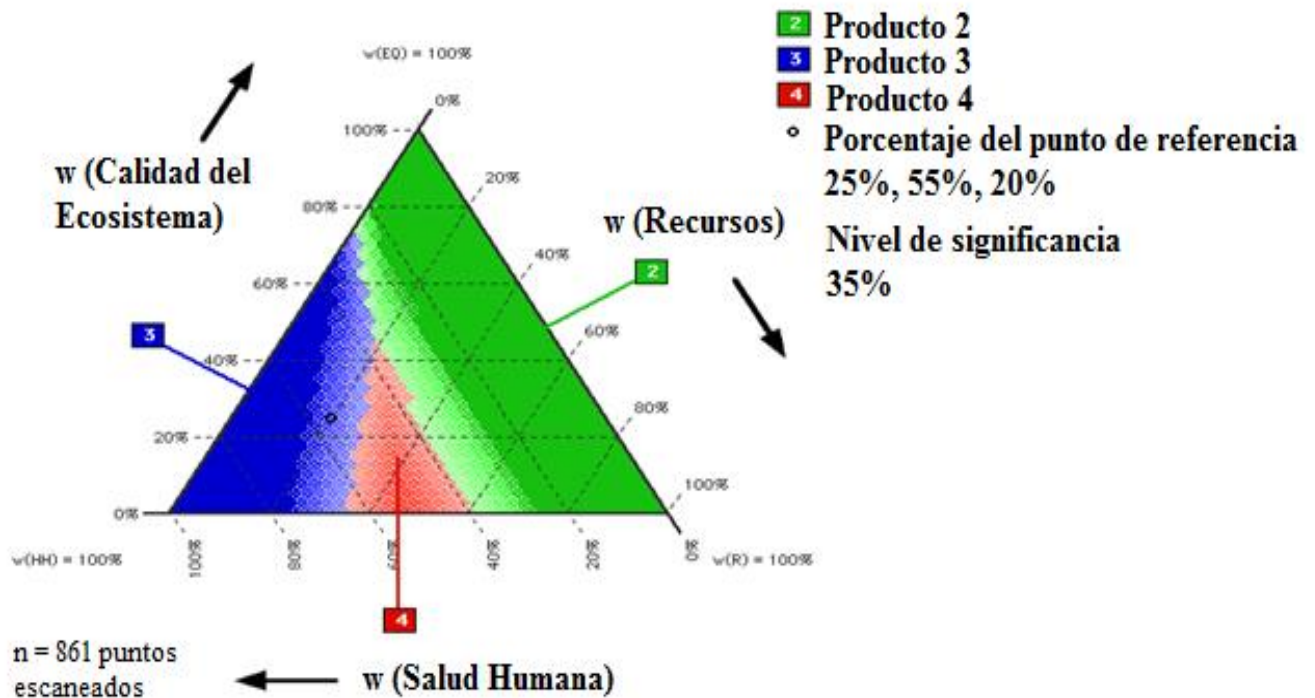


Gráfico 1.6: Ejemplo de triángulo de mezcla en la ponderación de 3 productos

Fuente: <http://www.doka.ch/EI99/mixtri.htm>

En el gráfico 6 se muestra una comparativa de los impactos ambientales de una serie de productos con los diferentes resultados por el hecho de asignar diferentes daños a la salud humana, calidad del ecosistema y los recursos. La suma total de los pesos es el 100% para cada punto. El triángulo muestra el producto con menor carga ambiental. En el gráfico se observa que sólo los productos 2 y 3 tienen áreas en las que solo ellos son significativamente mejores, la zona con carga más baja y sin sombreado. El producto 4 no presenta una superficie dominante significativa lo que nos lleva a pensar que el producto 4 no es el mejor. El producto 1 no se muestra al tratarse del peor de los cuatro productos.

El triángulo de ponderación solo se utiliza para la comparación de tres categorías y por ello, para aplicar la ponderación a este indicador, solo se pueden contemplar dos

categorías con las más altas correlaciones para la mayoría de las situaciones que son las correspondientes al cambio climático y los recursos¹²².

• **ReCiPe:**

Método desarrollado por organizaciones dedicadas al estudio del análisis de ciclo de vida y se considera como la continuación de las metodologías CML 2002 y Eco indicador 99. Las puntuaciones de los indicadores se determinan de forma similar al Eco indicador 99 y combina las perspectivas de los modelos del punto medio y punto final. Para el punto medio se contemplan 18 categorías:

- *Cambio climático*
- *Agotamiento de la capa de ozono*
- *Acidificación terrestre*
- *Eutrofización en agua dulce*
- *Eutrofización marina*
- *Toxicidad humana*
- *Formación de oxidantes fotoquímicos*
- *Formación de partículas*
- *Ecotoxicidad terrestre*
- *Ecotoxicidad en agua dulce*
- *Ecotoxicidad marina*
- *Radiación ionizante*
- *Uso del terreno agrícola*
- *Uso del terreno urbano*
- *Transformación del terreno natural*
- *Agotamiento del agua*
- *Agotamiento recursos minerales*
- *Agotamiento de los combustibles fósiles*

Para el modelo del punto final se consideran tres categorías dirigidas a la protección del medio ambiente:

- *Daños a la salud humana*
- *Daños a la Eco diversidad*
- *Daños a la disponibilidad de los recursos*

En el desarrollo de la caracterización y normalización se eligió como referencia el año 2000 recopilando información de todo el continente europeo. Los factores de

¹²² Humbert S., Margni M., Joliet O., “A user guide for the New Life Cycle Impact Assessment Methodology IMPACT 2002+”, (v2.1), 2005.

normalización del modelo del punto medio se modificaron el año 2010¹²³. La ponderación se desarrolla mediante un panel de enfoque.

- **EF** (Ecological Footprint)

Se define como la tierra y el agua, biológicamente productivas, necesarias para que una población, produzca los recursos necesarios para el consumo y para la absorción de parte de los residuos fósiles y los debidos al consumo del combustible nuclear, generados. En el contexto de ACV, la huella ecológica de un producto se define como la suma del tiempo integrado directa o indirectamente, del uso de la tierra relacionada con el uso de la energía nuclear y las respectivas emisiones de CO₂ derivadas del uso de la energía fósil¹²⁴ y se representa mediante la siguiente expresión:

$$EF = EF_{direct} + EF_{CO2} + EF_{nuclear} \text{ [Ecuación 1.11]}$$

La normalización no se aplica a este método y para la obtención de un valor de categoría de impacto, se le asigna el valor 1.

- **EDP** (Daño Potencial al Ecosistema)

Se trata de una metodología para la evaluación de impacto basado en la caracterización del uso de la tierra y su transformación. Se basa en la evaluación del impacto del uso del suelo sobre la diversidad de especies.

Inicialmente, se creó basándose en la información experimental de la diversidad de las especies existentes en Europa Occidental mediante un muestreo de 5581 parcelas. Su cálculo, se efectúa mediante 53 factores de caracterización para el uso de la tierra y 6 tipos de intensidad. Se basa en la clasificación CORINE PLUS de tal forma que los daños potenciales al ecosistema vienen derivados de las transformaciones lineales del número de especies relativas y el cálculo de este daño se orienta al punto final¹²⁵.

¹²³ Sleeswijka A.W., Van Oers L.F., Guinee J.B., Struijsd J., Huijbregtsb M.A.J., “*Normalization in Product Life Cycle Assessment: An LCA of the Global and European Economic Systems in the Year 2000*”, Science of the Total Environment pág.390, 2008.

¹²⁴ Wackernagel M. “*Ecological Footprint. and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Toward Sustainability*” (PhD thesis). Vancouver, Canada: School of Community and Regional Planning. The University of British Columbia, 1994.

¹²⁵ Koellner T., Scholz R. “*Assessment of Land Use Impact on the Natural Environment: Part I: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change*”. International Journal LCA N°12 (1), pág.16-23, 2007.

El factor de impacto para el uso del suelo tiene una referencia desconocida para antes o después de la transformación de la tierra y por ello se elige un valor $EDP = 0,8$ que representa el máximo daño potencial al ecosistema, siendo el impacto más negativo para el uso del suelo.

Las categorías de impacto que figuran en Sima Pro 8.0 son:

- *Transformación de la tierra*, resultado de la suma de la transformación de un tipo de uso del suelo y la transformación a la tierra del tipo de uso de suelo anterior.
- *Ocupación del suelo*.

La normalización no forma parte de este método y dado que estas dos categorías de impacto se expresan en puntos, PréConsultants añadió un paso de ponderación asignado a cada categoría de impacto el factor 1.

• IPCC 2013¹²⁶

Es una actualización del IPCC 2007 y enumera los factores de cambio climático del IPCC en un plazo de 20, 100 y 500 años.

Los factores de caracterización para el potencial calentamiento global directo de las emisiones de gases a la atmósfera, exceptuando el gas metano son los siguientes:

- *Emisiones de nitrógeno sin incluir la formación indirecta de N_2O .*
- *En las emisiones de NO_x , agua, sulfato, etc. En la estratosfera inferior y la troposfera superior, no se contemplan las emisiones radiativas forzadas.*
- *Los diversos efectos indirectos contemplados por el IPCC no se tienen en cuenta.*
- *En las emisiones de CO , no se tiene en cuenta la formación de CO_2 .*

La normalización y ponderación no forman parte de este método.

• USEtox¹²⁷

Se trata de un modelo ambiental para la caracterización comparativa de los impactos humanos y eco toxicológicos en la evaluación del impacto del ciclo de vida y la evaluación de posibles riesgos. USEtox se ha desarrollado para especificar el destino, la

¹²⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fifth Assessment Report. The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. 2007.

¹²⁷ USEtoxTM. The USEtox Team is a core team of international researchers from the Task Force on Toxic Impacts (TF LCIA 3) under the auspices of UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. Retrieved from www.usetox.org. 2009.

exposición y los efectos de los productos químicos en el medioambiente¹²⁸, este método se encuentra bajo revisión.

En la caracterización, la evaluación del impacto del ciclo de vida pretende explicar la importancia relativa de las emisiones individuales en el inventario del ciclo de vida (ICV). Esto se consigue mediante una suma ponderada de las emisiones contaminantes de un producto, mediante factores de caracterización.

La expresión que responde a esto viene determinada por:

$$IS = \sum_i \sum_x CF_{x,i} \times M_{x,i} \quad [\text{Ecuación 1.12}]$$

IS: Puntuación de impacto cada caso

CF_{x,i}: Caracterización de la sustancia x para el compartimento i, expresado en casos/kg

M_{x,i}: Emisiones de la sustancia x hacia el compartimento i, expresado en kg.

Este método, también calcula la caracterización de factores de impacto cancerígenos, no cancerígenos y el impacto total suma de ellos, para las emisiones químicas en el aire urbano, rural, agua dulce, salada y suelo (agrícola y natural). La unidad para el factor de caracterización correspondiente a la ecotoxicidad en agua dulce viene expresada, en $\text{PAF} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{día/kg}_{\text{emisión}}$ y para la toxicidad humana en $\text{casos/kg}_{\text{emisión}}$.

Los factores de caracterización aportados, se clasifican de la siguiente manera¹²⁹:

- *Recomendados*
- *Provisionales*

Los factores recomendados son los de las sustancias propias para el modelo USEtox, que aportan una calidad suficiente para ser recomendadas. Para los casos en los que se prevé una incertidumbre alta en el tratamiento final, como la exposición o los efectos de una sustancia química, se califica el factor como provisional y esto se recomienda en los casos en que la sustancia es un metal, un componente inorgánico u

¹²⁸ Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., Macleod M., Margni M., van de Meent D., Rosenbaum R., McKone T. "Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony". Environm.Scienc. & Techn., N°42(19), 2008.

¹²⁹ Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., Van de Meent D., Hauschild M.Z. *USEtox – the UNEP-SETAC Toxicity Model: Recommended Characterization Factors for Human Toxicity and Freshwater Eco Toxicity in Life Cycle Impact Assessment*. International Journal LCA N°13(7), pág.532-546, 2008.

organometálico, un anfifílico o cuando existe una disociación en condiciones ambientales. También se recomienda que los factores de caracterización ecotoxicológicos acuáticos, se especifiquen como provisional en el supuesto de que el efecto de los factores se base en datos de toxicidad de especies que cubren menos de tres niveles tróficos diferentes, de esta manera se asegura la mínima variabilidad de respuesta biológica.

Los desarrolladores de este método recomiendan una serie de reglas para los factores de caracterización para emisiones inorgánicas:

- *Sb*: Los factores de caracterización de Sb (+5) se utilizan para representar dichos factores de la forma no especificada de antimonio iónico y metálico.
- *As*: Los factores de caracterización del As(+5) se utilizan para representar dichos factores de la forma no especificada de arsénico iónico y metálico.
- *Cr*: Los factores de caracterización para el Cr genérico se define como el 50% de factor de caracterización para Cr(+3) y 50% para Cr(+6). Debido a que no se especifica la forma oxidada de los iones Cr, se aplica el mismo método a los iones Cr.

Algunos autores¹³⁰ desarrollaron referencias de normalización para Europa y USA en la aplicación de factores de caracterización en USEtox basándose en los años 2004 y el período 2002/2008 en cada caso. Los dos inventarios se caracterizaron mediante el modelo USEtox con factores de caracterización recomendados y provisionales. En Sima Pro, esta versión, figura como “default” e incluye factores de normalización.

• Huella Hídrica

Los métodos para el cálculo de la huella hídrica se resumen en los que dependen de la escasez de agua y los que provocan el daño al ecosistema o a la salud humana.

¹³⁰ Laurent A., Lautier A., Rosenbaum R.K., Olsen S.I., Hauschild M.Z. “*Normalization references for Europe and North America for application with USEtox™ characterization factors*”. International Journal LCA N°16(8), pág.728-738. 2011.

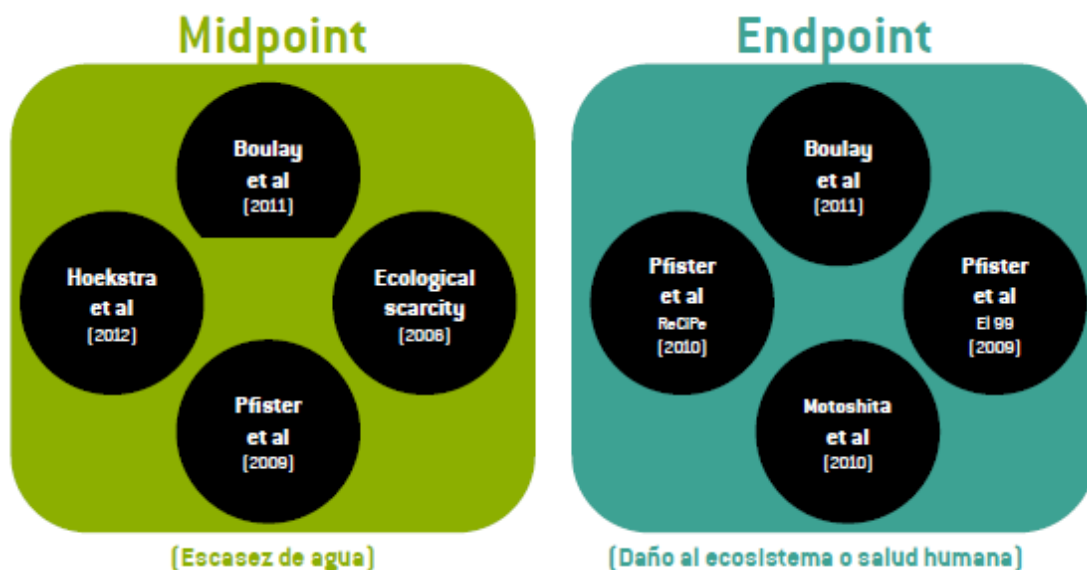


Gráfico 1.7: Métodos para el cálculo de la Huella Hídrica

Fuente: Lavola

Es un método de punto final basado en las conclusiones de Boulay et al. (2011)¹³¹ y se expresa en DALY y se obtiene mediante el cálculo del consumo de agua, ocasionado por cada persona. Presenta tres formas de impacto:

- Falta de agua en el ámbito agrícola
- Falta de agua en el ámbito de la pesca
- Enfermedades asociadas a la falta de agua

Las causas y los efectos se basan en datos hidrológicos y socioeconómicos. El índice para la escasez de agua sigue un orden de punto medio y el nivel de desarrollo económico se considera según la capacidad de adaptación basándose en la renta nacional bruta.

El método de la huella hídrica se basa en dos categorías concernientes a la salud humana, la distribución y la marginal. El efecto de la primera se aplica a todos los tipos de consumo de agua y la segunda viene referida a la evaluación de impacto por el que los usuarios se ven afectados debido a su participación en la distribución del uso de ella (agricultura, pesca y doméstica). Los efectos marginales se aplican para el consumo agrícola.

¹³¹ Boulay A.M., Bulle C., Bayart J.B., Deschenes L., Margni M. "Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health". Environmental Science & Technology N°45, pág.8948-8957, 2011.

Otro punto de vista, para este método, es el aportado por Boulay et al. 2011 y se basa en una ratio, de disponibilidad de consumo. Los indicadores de escasez abarcan aguas superficiales y subterráneas tomando el consumo de agua y disponibilidad de los datos desde el modelo WaterGAP aplicando el indicador al volumen de agua consumido.

Otro método de evaluación es el basado en el Ecological Scarcity 1997 y se trata del Ecological Scarcity 2006 o Eco puntos 97 (en SimaPro 8.0). La base de datos Ecoinvent contiene siete categorías de impacto específicas con un marcador final (UBP) para cada sustancia, como factor de caracterización y se trata de un método con categoría de impacto para los recursos hídricos.

Según Hoekstra et al 2012¹³², el indicador correspondiente a la escasez de agua (WSI), se basa en una relación de consumo y disponibilidad (CTA) y corresponde a la relación entre la fracción de agua disponible consumida (huella hídrica azul) y el agua total disponible. Los resultados disponibles se deben a las principales cuencas hidrográficas mundiales. El indicador se aplica al volumen de agua consumida y se evalúa solamente el agua de consumo.

Otro método para el cálculo de la huella hídrica es el basado en la publicación de Motoshita et al 2011¹³³ para la salud humana y el indicador para este método es de punto final con dos categorías para la salud humana, una para daños por enfermedad infecciosa por la escasez de agua para uso doméstico debido a la ausencia de acceso al agua potable y se basa en datos hidrológicos y socio-económicos mediante un índice Pfister et al 2009¹³⁴, de punto medio, y otra para el daño ocasionado por la escasez de agua en medios agrícolas cuyos impactos se modelan utilizando la misma base de datos para la escasez y distribución que el anterior multiplicado por un parámetro socio-económico para el efecto sobre el comercio y cuantificado en DALY/Kcal desnutrición.

Existen diferentes concepciones adicionales sobre este método, pero no se consideran en el presente estudio.

¹³² Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., Chapagain A.K., Mathews R.E., Richter B.D. “*Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprint versus Blue Water Availability*”. PLUS ONE N°7(2): e32688. DOI:10.1371, 2012.

¹³³ Motoshita M., Itsubo N., Inaba A. “*Development of Impact Factors on Damage to Health by Infectious Diseases Caused by Domestic Water Scarcity*”. International Journal LCA N°16, pág.65-73, 2011.

¹³⁴ Pfister S., Koehler A., Hellweg S. “*Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA*”. Environmental Science and Technology, N°43(11), pág.4098-4104; DOI: 10.1021/es802423e., 2009.

A partir de todo esto, para seleccionar la metodología de impacto tendremos que tener las siguientes consideraciones:

- Para conocer los tipos y el número de indicadores tendremos que ceñirnos a metodologías de un único indicador o de varios indicadores.
- Para el tipo de indicadores nos dirigiremos al método de “Midpoint” para medidas a nivel sustancias y “Endpoint” para medidas del daño causado.
- Desde diferentes puntos de vista: Individualista, Jerárquico o Igualitario.

Las categorías de impacto que queramos conocer se resumen en el siguiente cuadro resumen:

Categoría de Impacto	Descripción	Unidades
Huella de Carbono	Emisiones de CO ₂ u otros gases de Efecto Invernadero	kg CO ₂ equivalente
Agotamiento de la capa de Ozono	Emisiones de CFC's y otros gases degradantes de las capas altas de la atmósfera (estratosfera)	kg CFC 11 equivalente
Toxicidad Humana	Emisión de sustancias o partículas que pueden generar enfermedades (respiratorias, cancerígenas, alérgicas...) en los humanos	kg 1,4-DBequivalente
Formación de Partículas	Formación de pequeñas partículas sólidas o líquidas dispersas por la atmósfera cuyo diámetro es inferior a 10 µm, capaces de provocar complicaciones respiratorias.	kg PM 10 equivalente
Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación de “smog” fotoquímico (coexistencia de reactivos y productos en una atmósfera urbana, cuando existen NO _x , CO, CH ₄ y otros compuestos orgánicos volátiles COV's en presencia de radiación solar), que provoca daños respiratorios y a la vegetación.	kg NMVOC
Acidificación Terrestre	Exceso de SO _x , NO _x o NH ₃ que provocan el descenso del pH del medio.	kg SO ₂ equivalente
Eutrofización de agua dulce	Exceso de materia orgánica en el agua que provoca el agotamiento de O ₂ y nutrientes.	kg P equivalente
Ocupación de terreno agrícola	Superficie de suelo agrícola, ocupado por año.	m ² año
Ocupación de suelo urbano	Superficie de suelo urbano, ocupado por año.	m ² año
Huella Hídrica	Agotamiento de recursos hídricos.	m ³ agua
Agotamiento de recursos fósiles	Consumo de recursos no renovables del planeta (combustibles fósiles o minerales)	kg Oil equivalente

Método de evaluación desde el punto de vista energético:

Desde el punto de vista energético los métodos de evaluación más corrientes corresponden a:

- **CED¹³⁵** (Cumulative Energy Demand)

Se basa en el método publicado por Ecoinvent en su versión 1.01 y ampliada por Pré Consultants mediante los recursos energéticos presentes en la base de datos del programa Sima Pro con la incorporación de sustancias adicionales presentes en la base de datos de Ecoinvent 2.0¹³⁶.

Los factores de caracterización para los recursos energéticos, están divididos en cinco categorías de impacto que corresponden a:

- *Energías procedentes de combustibles fósiles, no renovables*
- *Energía nuclear, no renovable*
- *Energía procedente de biomasa, renovable*
- *Energía procedente de tecnología eólica, solar y geotérmica, renovable*
- *Energía procedente del agua, renovable*

La normalización, no se aplica a este método y con para conseguir el total acumulado de demanda energética, a cada categoría de impacto se le asigna el factor de ponderación 1.

- **CExD** (Cumulative Exergy Demand)

Se trata de un indicador que representa la eliminación total de la exergía de todos los recursos necesarios de la naturaleza para obtener un producto. Determina la calidad de la demanda de energética, además, incluye la exergía en la conducción de la energía y lo materiales no energéticos. La concepción del término exergía se aplicó a los recursos existentes en la base de datos Ecoinvent considerando los diferentes tipos de energía como pueden ser la química, la cinética, la potencial, hidroeléctrica, nuclear, solar y térmica¹³⁷.

Para de la demanda de exergía de determinado producto, en el Análisis de Ciclo de Vida, el indicador CExD se define como la suma de la exergía de todos los recursos necesarios para desarrollar ese proceso o producto. Por otro lado, la exergía, es una forma de expresar la calidad de la energía y se mide en mega julios. Como ejemplo se puede tomar el del gas natural con un valor elevado de exergía debido a que se puede utilizar

¹³⁵ Huijbregts M.A.J., Hellweg S., Frischknecht R., Hendrik H.W., Hungerbühler K., Hendriks, A.J. “Cumulative Energy Demand as Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production”, Environmental Science and Technology, N°44, pág.2189-2196, 2010.

¹³⁶ Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T., Spielmann M. “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0”. Ecoinvent report N°3, Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland, 2007.

¹³⁷ Bösch M.E., Hellweg S., Huijbregts M.A.J., Frischknecht, R. “Applying Cumulative Energy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database”. International Journal LCA N°12 (3), pág.181–190, 2007.

para la generación de vapor a alta presión mediante elevadas temperaturas, pero si es utilizado para la calefacción de una superficie mediante una caldera eficiente, la pérdida energética es pequeña pero la de exergía se pierde casi por completo.

Para este método, la exergía se utiliza como medida de pérdida de recursos energéticos útiles. Para este método, la exergía, se obtiene de la base de datos Ecoinvent 2.0.

Para la caracterización de este método, el indicador de categoría de impacto, se agrupa en las categorías de recursos correspondientes a combustibles fósiles, nuclear, hidroeléctrica, biomasa, otras energías renovables, agua, minerales y metales. En el software utilizado, Sima Pro 8.0, se encuentran las siguientes categorías de impacto:

- *Energías procedentes de combustibles fósiles, no renovables*
- *Energía Nuclear, no renovable*
- *Energía Cinética, renovable*
- *Energía Solar, renovable*
- *Energía Potencial, renovable*
- *Energías Primarias, no renovables*
- *Energía procedente de biomasa, renovable*
- *Energía procedente de metales, no renovable*
- *Energía procedente de minerales, no renovable*

Para los cálculos, se han incluido los factores de caracterización de exergía para 112 recursos distintos aplicando la siguiente expresión:

$$CExD = \sum_i m_i * Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j * r_{ex-e(k,p,n,r,t),j} \quad [\text{Ecuación 1.13}]$$

Siendo:

CExD: Demanda acumulada de exergía por unidad de producto o proceso en MJ_{eq}

m_i: Masa de recursos materiales i en kg

Ex_{(ch),i}: Exergía por Kg de sustancia i en MJ_{eq}/Kg

n_j: Cantidad de energía del portador j en MJ

r_{ex-e(k,p,n,r,t),i}: Relación de exergía con la exergía del portador j en MJ_{eq}/MJ

ch: Química

k: Cinética

p: Potencial

n: Nuclear

r: Radiativa

t: Exergía térmica

Dependiendo del uso de los recursos, la aplicación del tipo de exergía adecuada será:

- *Exergía Química*: Aplicable a todos los recursos materiales, combustibles de biomasa, agua y combustibles fósiles.
- *Exergía Térmica*: Aplicable para la Geotermia en la que la obtención de calor no implica extracción.
- *Exergía Cinética*: Aplicable sobre la energía cinética del viento, en el caso de los aerogeneradores.
- *Exergía Potencial*: Aplicable a la energía potencial generado por un salto de agua en una central hidroeléctrica.
- *Exergía Nuclear*: Aplicable sobre el combustible nuclear consumido en las reacciones de fisión en las centrales nucleares.
- *Exergía Radiativa*: Aplicable sobre la radiación solar incidente sobre los paneles solares.

La normalización no forma parte de este método y para obtener un valor total acumulado de la demanda de exergía para cada categoría de impacto, se da como factor de ponderación el 1.

De forma resumida, las etapas de un Análisis de Ciclo de Vida se exponen en el Gráfico 1.8:

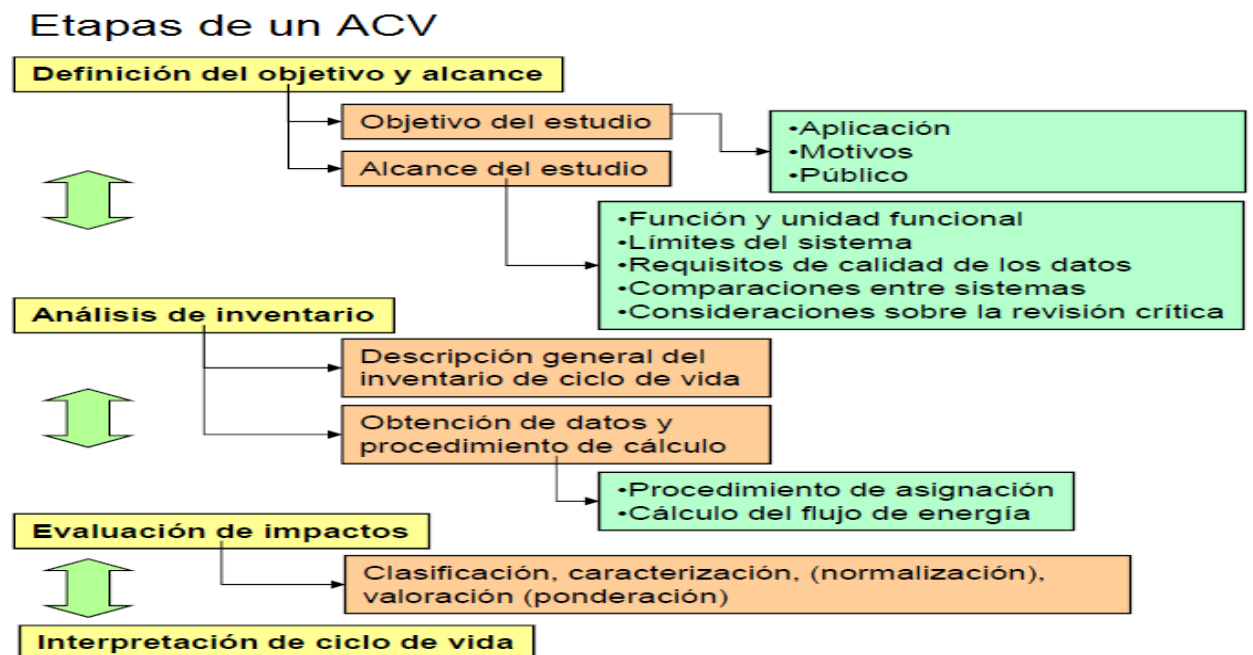


Gráfico 1.8: Etapas de un ACV.
Fuente: Lavola

1.5.3.- Software utilizado

Los diferentes estudios realizados de Análisis de Ciclo de Vida se han desarrollado mediante la herramienta informática Sima Pro 8.0.1, desarrollado por la organización PréConsultants y mediante el cual se ha podido realizar un ACV completo con varios métodos de evaluación de impacto para el cálculo de los impactos a través de las sugerencias pertinentes de las normas ISO e ILCD Handbook.

La ventaja del uso de este software radica en su extensa base de datos en la que figuran diversos proyectos que contienen todos los inputs y outputs y contiene entradas de diferentes sustancias, unidades de medida y referencias bibliográficas de diferentes autores con datos de materiales, energía, métodos de evaluación de impacto etc.

Los procesos se clasifican en siete categorías que corresponden a energía, materiales, transporte, fabricación, uso, residuos y tratamiento de estos.

Un apartado importante en Sima Pro 8.0.1 es el sistema de indicadores de calidad de los datos conforme a las condiciones mostradas en la norma ISO 14040 y mediante dicho sistema se evalúa la idoneidad de los datos mediante dotándoles de una puntuación acorde al perfil específico permitiendo el análisis de incertidumbre con el método Montecarlo.

Mediante la recopilación del máximo número de datos precisos para el estudio, se confecciona el inventario del ciclo de vida (ICV) y esto se hace mediante la incorporación de los datos que no se encuentran en las librerías del programa para introducirlos en los registros de los procesos, a continuación, Sima Pro 8.0.1 genera de forma automática un diagrama de flujos juntando todos los procesos.

La estructura de la base de datos de Sima Pro presenta tres niveles:

Datos del Proyecto: Datos específicos del proyecto que se está ejecutando.

Datos de Biblioteca (BBDD): Son los datos recurrentes para nuestro proyecto.

Datos Generales: Son los datos comunes de soporte para todas las bibliotecas y proyectos entre los que se encuentran los factores de conversión y principales sustancias.

En cuanto a la evaluación de impacto, esta herramienta informática, contiene los métodos de evaluación de impacto de mayor reconocimiento utilizando, todos ellos, la

técnica de caracterización mediante la cual se calcula la contribución correspondiente de una sustancia a una categoría de impacto determinada. Algunos de estos métodos utilizan las técnicas de evaluación del daño, normalización o ponderación.

Cuando se ejecuta el programa se abre un proyecto nuevo sobre el que se va a basar nuestro estudio y seguidamente se pasa a la primera fase que como ya se ha comentado es la correspondiente al *objetivo y alcance* que presenta un primer campo en el que se encuentra la descripción con múltiples campos para incorporar el objetivo del proyecto, la unidad funcional y detalles varios. En este apartado y como submenú se encuentran las bibliotecas donde están las bases de datos disponibles. En ellas, los datos de inventario del ciclo de vida son los más actualizados y se obtienen de la zona geográfica del proyecto. La documentación completa de las fuentes de datos, la calidad de ellos y las hipótesis asociadas son de gran importancia.

El siguiente menú corresponde al *inventario* que está compuesto por:

Procesos: Es elemento unitario del modelo. Son módulos del árbol del proyecto que contienen datos ambientales enlazados con la naturaleza como son materiales, energía, transporte, procesamiento, uso, escenario de residuos y tratamiento de ellos. Contiene información ambiental y económica.

La procedencia de los procesos puede ser provenientes de la Ecosfera, entradas de la naturaleza y expresan el uso de los recursos naturales, son materiales tal y como existen en ella y no tienen emisiones ni consumo de energía, asociados a ellos o provenientes de la tecnosfera que son entradas que provienen de otros procesos.

Los tipos de procesos pueden ser de sistema que incluyen solo los recursos de la naturaleza y las emisiones o unitarios en los que se identifican todos los subprocesos utilizados (cada uno tendrá sus entradas desde la naturaleza y sus emisiones).

En cuanto al aspecto de entradas de energía se han de anotar las fuentes y unidades las cuales se pueden enfocar desde el punto específico del sistema a estudiar o desde los datos medios del ámbito geográfico (“Mix” energético), No tiene el mismo impacto ambiental el consumo de 1KW_h en España que en Francia.

Inventario de ciclo de vida (ICV): Balances por procesos

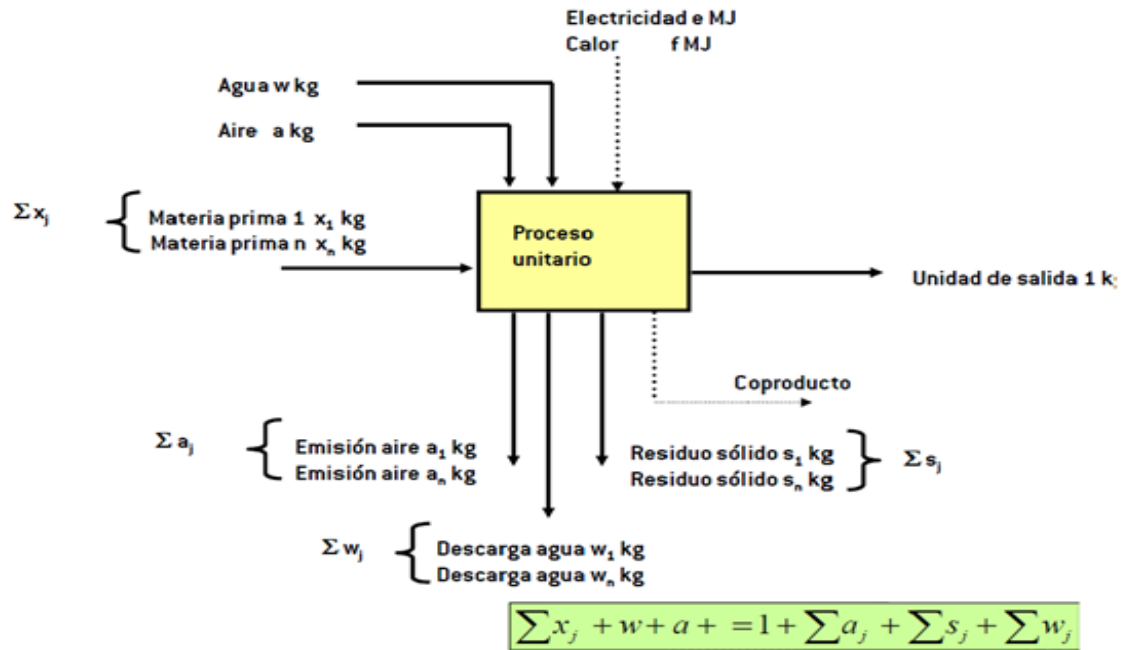


Gráfico 1.9: Balance de procesos en el inventario de ciclo de vida.

Fuente: Lavola

Etapas del Producto: No contiene información medioambiental, pero describen el producto y su ciclo de vida que sí enlazan con la naturaleza y son el montaje y desmontaje, escenario de destino final, reutilización y ciclo de vida. Se trata de información estructural.

Descripción del sistema: Es un listado de los diferentes sistemas que contienen las bases de datos.

Tipos de residuos: Es un listado de los materiales con tratamiento de fin de vida en las bases de datos.

Parámetros: En este apartado se pueden introducir parámetros en general o para determinado proceso como pueden ser las toneladas por kilómetro, transportadas y mediante ellos se puede realizar un análisis de sensibilidad y de diferentes escenarios.

La siguiente fase es la correspondiente al *Análisis de Impacto* en el que aparece un listado de diferentes modelos de impacto disponibles. Permite la creación de métodos propios.

La última fase corresponde a la *Interpretación de resultados* y en ella se discuten los resultados del análisis de inventarios y la evaluación de impacto. Los resultados de esta interpretación son la base para obtener las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. Permite la determinación de la fase del ciclo de vida en la que se generan las principales cargas ambientales para el producto y por ello los puntos del sistema evaluado, mejorables. Cuando se trata de la comparación de productos se puede determinar cuál de ellos presenta mejor comportamiento ambiental.

1.5.3.1.- Métodos considerados en SimaPro

La estructura básica de los métodos para el análisis de impacto en el software de apoyo Sima Pro 8.0 han sido explicados anteriormente pero seguidamente se desarrollan más en concreto para este software:

Caracterización: Las sustancias que contribuyen a determinada categoría de impacto, son multiplicadas por un factor de caracterización que expresa la contribución relativa de dicha sustancia. Un ejemplo para entender esto sería, el factor de caracterización para el CO₂ para la categoría de impacto del cambio climático podría ser de 1 unidad mientras que el del CH₄ sería 25, lo que significa que la emisión de 1 kg. de CH₄ provoca el mismo impacto, en la categoría considerada, que 25 kg. de CO₂. El resultado total de este tipo de operaciones, se expresa como indicador de dicha categoría de impacto.

En Sima Pro 8.0, se pueden especificar sub-compartmentos para cada sustancia, como puede ser el caso de definir una emisión de agua como si fuera un sub-compartmento del océano. Esta situación permite la generación de métodos de evaluación de impacto, detallados, con factores de caracterización específicos para cada compartmento. Hay métodos de evaluación de impacto que no tienen este nivel de detalle para los sub-compartmentos debido al inventariado. En estos casos, SimaPro 8.0 elige el factor de caracterización no especificado, como predeterminado, para una sustancia especificada en el inventario sin tener ningún factor de caracterización específico en la evaluación del método de impacto seleccionado.

Análisis de Daños: Es un nuevo avance para la evaluación de los diferentes impactos. Se realizan utilizando métodos de punto final como el Ecoindicador99 y el EPS2000.

El objetivo del Análisis de Daños es la combinación de una serie de indicadores de categoría impacto en una categoría de daños o área de protección. En esta etapa de análisis de daños, se pueden agregar categorías de indicadores de impacto mediante una unidad común. Como ejemplo, en el método Ecoindicador99, todas las categorías de impacto referidas a la salud humana, se expresan en años de vida ajustados por discapacidad (DALY) y en este método, los daños causados por sustancias carcinogénicas se pueden añadir a los daños causados por el cambio climático.

Normalización: La existencia de diversos métodos permite que los resultados obtenidos por los indicadores de categoría de impacto, sean comparados con valor de referencia lo que significa que la categoría de impacto se divide por dicha referencia y una de las referencias más utilizadas es la carga ambiental promedio anual de un país entre el número de habitantes que lo integran, aunque la referencia se puede elegir libremente.

En Sima Pro 8.0, es frecuente, que haya una normalización alternativa pudiéndose aplicar a los resultados de evaluación de la caracterización y de daños.

Ponderación: Hay algunos métodos que admiten la ponderación de las categorías de impacto lo que significa que los resultados de la categoría de impacto se multiplican por factores de ponderación, y se suman para obtener una puntuación total o individual. La ponderación, puede aplicarse o no en puntuaciones normalizadas porque en algunos métodos, como es el caso del EPS, no existe una etapa de normalización.

En Sima Pro 8.0, existe a menudo, una ponderación alternativa combinada con una normalización previamente establecida.

1.5.3.2.- SAM (System Advisor Model)

El software SAM es una herramienta informática creada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) con la finalidad de ayudar al usuario a la generación de un modelo de planta solar, ajustado a sus necesidades. Es un modelo de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables para su vertido directamente a la red eléctrica general o para consumidores particulares. Ha sido diseñado para facilitar la toma de decisiones para empresas y particulares, involucrados en el mundo de las energías renovables.

Este programa informático, hace predicciones de rendimientos y costes estimados de generación energética teniendo en cuenta diferentes parámetros como pueden ser los costes de instalación y operación, así como los parámetros de diseño del sistema considerado a partir de una serie de valores predeterminados que se introducen y se implementan con otros que aporta directamente el programa, para la instalación que se pretende generar. Una vez realizado el proceso de entrada de datos, su ejecución, permite una serie de simulaciones que aportan una serie de resultados que se revisan con posterioridad repitiendo el proceso hasta que los resultados sean fiables.

1.5.3.2.1.- Estructura del Modelo

El programa informático SAM, se compone de una interfaz de usuario, un motor de cálculo y una interfaz de programación. El primero, es la parte visible y proporciona el acceso a las variables de entrada, los controles de simulación y los controles y visualizaciones de tablas y gráficos resultantes en base a tres funciones:

- *Facilita el acceso a la introducción de variables que describen las características físicas de un sistema determinado, así como los costos del mismo. Las variables de entrada se rellenan con valores predeterminados para facilitar el desarrollo del proyecto.*
- *Permite el control en la ejecución de la simulación pudiendo darse el caso de una simulación para la optimización de un proyecto ya realizado.*
- *Facilita el acceso, en la página de resultados, a las variables de salida en tablas y gráficos.*

La aplicación informática SAM, a partir de las condiciones de los recursos de energías renovables y de la meteorología para el estudio de un proyecto, en determinada zona geográfica y dependiendo del tipo de sistema que se incluya en el proyecto, requiere de un archivo de datos meteorológicos ubicados en un listado que se puede descargar desde internet o, aunque es algo más complicado, crear un archivo propio introduciendo los diferentes datos geográficos y meteorológicos, de forma manual. También incluye bibliotecas de datos de rendimientos de los diferentes componentes del sistema, ya sea fotovoltaico, termosolar, eólica, etc. seleccionando el componente de una lista y el programa asigna directamente las variables de entrada desde las diferentes bases de datos online de las que se ha utilizado la siguiente:

- *NREL prospector solar de datos de recursos solares y condiciones climáticas ambientales.*

Para el resto de variables de entrada restantes se puede utilizar el valor por defectos del programa o introducir su valor de forma manual. Algunos ejemplos de variables son:

- Los costos de instalación incluyendo la compra de equipos, coste de la tierra, coste de operación y mantenimiento.
- Para el caso de tecnología fotovoltaica, el número de módulos e inversores, tipo de seguimiento, factores de reducción de potencia.
- Para el caso de la tecnología Cilindro-Parabólica se aportan diferentes tipos de colector, receptor, capacidad de almacenamiento, capacidad del bloque de potencia etc. al igual que para la tecnología de receptor central de torre con diferentes tipos de heliostatos, receptores, etc.

Los resultados obtenidos en nuestro modelo se representan mediante una serie de tablas, gráficos e informes incluyendo datos de coste nivelado de energía, producción anual de diferentes años, incluso datos de rendimiento por hora.

La versión del software SAM utilizado incluye modelos para las siguientes tecnologías:

- Sistemas fotovoltaicos de placa plana y de concentración.
- Sistemas CSP con tecnología cilindro-parabólico.
- Sistemas CSP con tecnología de receptor central de torre (con y sin almacenamiento térmico).
- Sistemas CSP con tecnología Fresnel.
- Sistemas CSP con tecnología de disco, Stirling.
- Sistemas de generación mediante tecnología eólica.
- Sistemas de generación mediante geotermia.
- Sistemas de generación mediante biomasa.

SAM permite la comparación entre diferentes proyectos mediante la creación de un archivo con más de un caso a estudio o la viabilidad en el estudio de un proyecto a gran escala comparado con la compra de energía.

1.5.3.2.2.- Datos aportados para las centrales a estudio

Para el desarrollo de un proyecto de construcción de una central termosolar, es primordial su localización teniendo en cuenta principalmente la radiación solar existente en la zona geográfica y otros aspectos no menos importantes como el área necesaria para ubicar todos los componentes de la planta y recursos como la disponibilidad de agua.

En la figura 1.23 se puede observar las condiciones favorables en cuanto a radiación solar y superficie disponible con amplias fincas de terreno regular y con posibilidad de recursos hídricos por la cercanía de embalses y ríos para la ubicación de la planta, en concreto, en la que ya existe la CSP Gemasolar con almacenamiento térmico en la localidad de Fuentes de Andalucía, provincia de Sevilla.

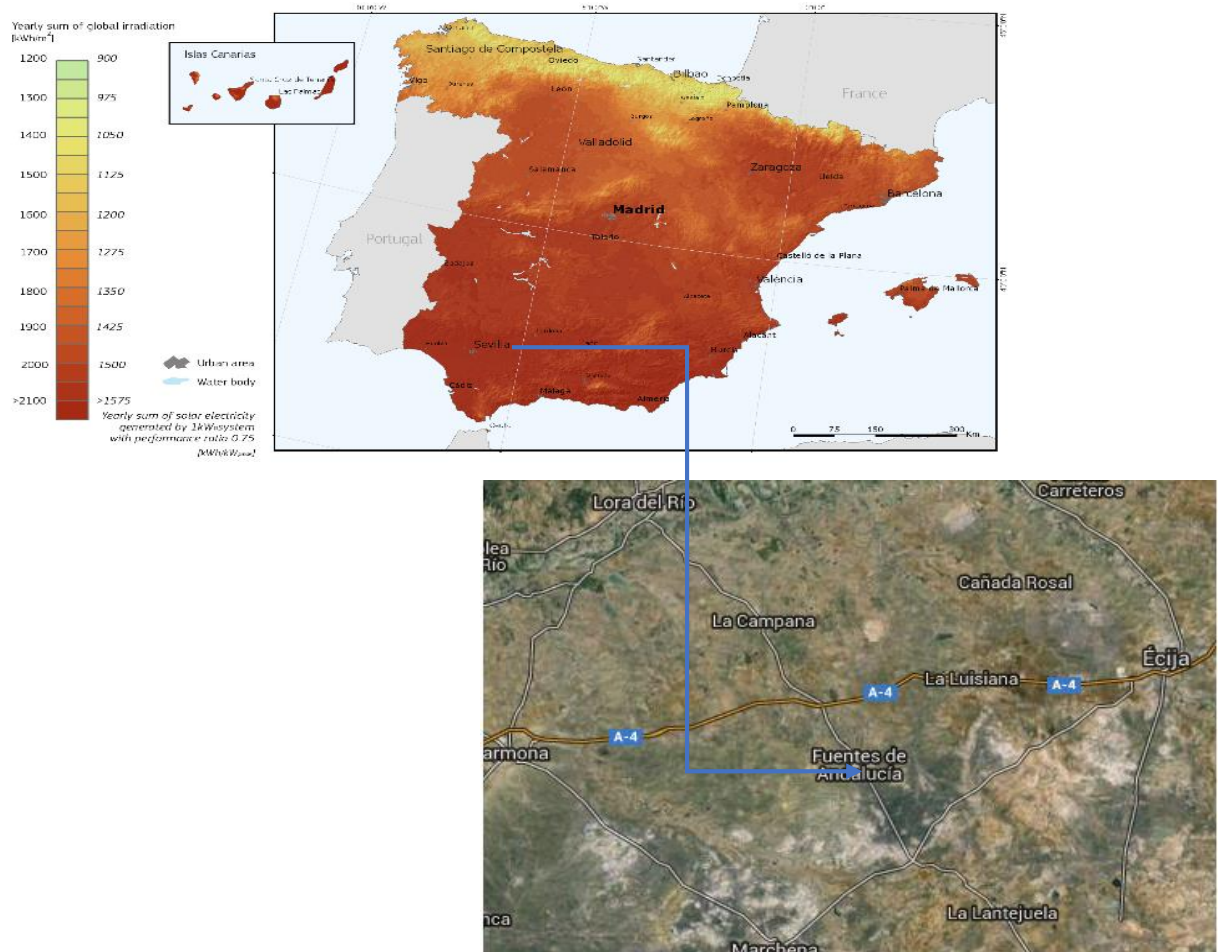


Figura 1.23: Radiación global y potencial de la energía solar en España y situación de la zona seleccionada.
Fuente: Institute for Energy and Transport (IET)

En la Figura 1.24 se muestra unas tablas de las radiaciones mensuales y diarias con un total anual de 1814 KWh/año.

RADIACIONES MENSUALES (kWh/mes)													(kWh/año)
	gen	feb	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	oct	nov	des	total anual
Directa	107,0	92,4	134,2	94,5	107,0	106,5	137,3	131,4	136,5	128,0	83,1	90,2	1348,1
Difusa	20,8	28,3	36,0	54,3	59,5	57,9	47,4	48,4	36,9	30,4	25,2	20,8	465,9
Global	127,8	120,7	170,2	148,8	166,5	164,4	184,7	179,8	173,4	158,4	108,3	111,0	1814

RADIACIONES DIARIAS (kWh/día)													(kWh/día)
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	media diaria
Directa	3,45	3,30	4,33	3,15	3,45	3,55	4,43	4,24	4,55	4,13	2,77	2,91	3,7
Difusa	0,67	1,01	1,16	1,81	1,92	1,93	1,53	1,56	1,23	0,98	0,84	0,67	1,3
Global	4,12	4,31	5,50	4,95	5,37	5,48	5,96	5,80	5,78	5,11	3,62	3,57	5,0

Figura 1.24: Tablas de los potenciales solares para usos térmicos.

Fuente: http://www.sevilla.org/urbanismo/plan_indicadores/8-Anexo2.pdf

El dimensionamiento del campo de heliostatos va depender de algunos factores como son la potencia de la central, el tamaño de los heliostatos, la radiación solar, altura de torre, geometría del receptor y volumen de los tanques de almacenamiento para conseguir el funcionamiento de la planta durante 15 horas en el caso de ausencia de radiación solar. En este caso se han aportado los datos necesarios al programa SAM para obtener la composición necesaria a la hora de obtener de forma continua la potencia requerida.

- **Planta CSP de receptor central de 19 MW_e**

La ubicación de la planta se introdujo teniendo en cuenta la base de datos existente en SAM y se obtuvieron los siguientes valores presentados en la Figura 1.25:

City	Sevilla	Time zone	GMT 1	Latitude	37.42 °N	Tools <input type="button" value="View hourly data..."/> <input type="button" value="Refresh library"/> <input type="button" value="Folder settings..."/> <input type="button" value="Open library folder..."/>
State	ESP	Elevation	31 m	Longitude	-5.9 °E	
Country	Spain	Data Source	IWEC	Station ID	083910	
Data file	C:\SAM\2015.1.30\solar_resource\Spain ESP Sevilla (INTL).csv					
- Annual irradiance and temperature summary						
Global horizontal	NaN	kWh/m ² /day	Average temperature	18.4	°C	Visit SAM weather data website
Direct normal (beam)	4.86	kWh/m ² /day	Average wind speed	2.7	m/s	
Diffuse horizontal	1.75	kWh/m ² /day				
Download a weather file from NREL Solar Prospector						
<input type="button" value="Download..."/>		Click Download and type a street address or coordinates (continental United States only) to download a weather file from the NREL Solar Prospector database. SAM will add the file to the solar resource library and display it in the list above.				
Visit Solar Prospector website						

Figura 1.25: Datos geográficos y de radiación anual y temperatura media de la ubicación de la planta de 17 MW_e.

Fuente: SAM (NREL)

Como se puede observar, se toma como temperatura media anual 18,4°C y una velocidad del viento media de 2,7 m/s.

Inicialmente se introdujo el valor de la potencia de salida de la turbina deseada para este caso, 19 MW_e con un almacenamiento térmico de 15 horas, obteniendo una potencia estimada de salida para el diseño, de 17 MW_e. La potencia térmica de diseño corresponde a 46,11 MW_t y control de planta determinado para un inicio de operaciones al alcanzar los 240°C que se estima en media hora. Se ha considerado que la tecnología utilizada en el ciclo de potencia es la correspondiente a un ciclo Rankine operando a una presión de 100 bares mediante condensador híbrido considerando una temperatura ambiente de diseño de 43°C como se muestra en la Figura 1.26:

Plant Capacity		
Design Turbine Gross Output	19	MWe
Estimated Gross to Net Conversion Factor	0.87	
Estimated Net Output at Design (Nameplate)	17	MWe
Parasitic losses typically reduce net output to approximately 90 % of design gross power		

Availability and Curtailment		
Curtailment and availability factors are annual or hourly factors that modify system output to represent system outages or other events.	Edit losses...	Annual loss: 4.0 % Hourly losses: None Custom periods: None

Power Block Design Point		
Rated Cycle Conversion Efficiency	0.412	
Design Thermal Power	46.1165	MWt
Design HTF Inlet Temp.	574	°C
Design HTF Outlet Temp.	290	°C
Fossil Backup Boiler LHV Efficiency	0.9	
Aux heater outlet set temp	594	°C
Fossil Dispatch Mode	Minimum backup level	

Plant Control		
Min. Required Temp. For Startup	500	°C
Low-resource Standby Period	2	hours
Fraction of Thermal Power Needed for Standby	0.2	
Power Block Startup Time	0.5	hours
Fraction of Thermal Power Needed for Startup	0.5	
Min Turbine Operation	0.25	
Max Turbine Over Design Operation	1.05	

Cycle Technology-Dependent Inputs		
Boiler Operating Pressure	100	Bar
Steam cycle blowdown fraction	0.02	
Turbine Inlet Pressure Control	Fixed pressure	
Condenser Type	Hybrid	
Ambient Temp at Design	43	°C
ITD at Design Point	16	°C
Ref. Condenser Water dT	10	°C
Approach Temperature	5	°C
Condenser Pressure Ratio	1.0028	
Min condenser pressure	2	inHg
Cooling system part load levels	8	
		Hybrid Dispatch
Period 1:		0
Period 2:		0
Period 3:		0
Period 4:		0
Period 5:		0
Period 6:		0
Period 7:		0
Period 8:		0
Period 9:		0

Hybrid dispatch control parameters refer to the dispatch periods defined on the thermal storage page.

Figura 1.26: Datos obtenidos de la capacidad de la planta de 19 MW_e para el diseño del bloque de potencia, control de planta y tecnología del ciclo.

Fuente: Software SAM (NREL)

El campo solar se generó de forma automática respetando los parámetros introducidos inicialmente para conseguir los requisitos comentados resultando de ello 1.202 heliostatos con los siguientes valores que se muestran en la Figura 27 y que corresponden al número de heliostatos necesarios en la planta, su distribución y coordenadas de acuerdo a un posicionamiento norte-sur para el eje y de la figura superior derecha del campo solar y este-oeste para el eje x del mismo, como se puede observar en dicha figura. Se ha dejado a elección del programa informático, la selección del tipo de heliostato con sus dimensiones y suponiendo un método de enfoque ideal.

El uso de terreno correspondiente a la totalidad de la planta es de 813.418 m², la superficie ocupada por el área total reflectiva de los heliostatos es de 173,539 m² y para el resto de campo no solar es de 182.109 m².

En el apartado de las limitaciones de disposición de campo solar se obtuvieron los siguientes valores:

- Altura de la torre con el receptor: 149,07 m.
- Máxima distancia de los heliostatos a la torre: 1.267,1 m.
- Mínima distancia de los heliostatos a la torre: 111,8 m.

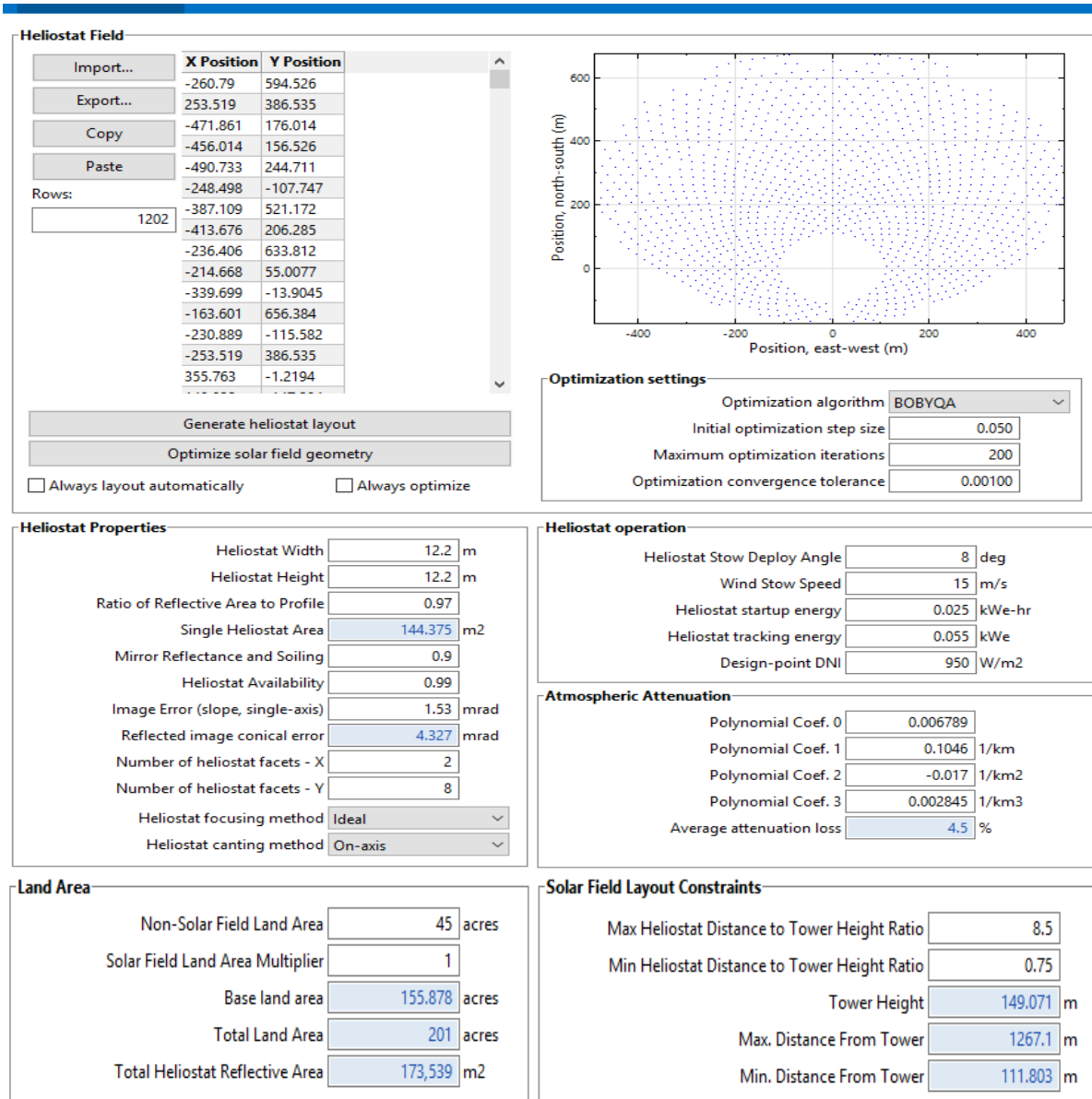


Figura 1.27: Datos obtenidos para el campo solar, propiedades de heliostatos uso del terreno y características relacionadas con ello para la planta de 19 MW_e.

Fuente: Software SAM (NREL)

Para el sistema de almacenamiento térmico se eligió un período de 15 horas para lo cual se obtuvo un volumen necesario para el tanque de almacenamiento de 3.218,23 m³. Las dimensiones del tanque corresponden a un diámetro de 14,31 m. y una altura de 20 m. La altura mínima del contenido en sales en el tanque es de 1 m. para un volumen mínimo de almacenamiento de sales de 160,912 m³ y el volumen máximo 3.057,32 m³.

Una vez iniciados los ciclos de trabajo en la planta, el volumen inicial de almacenamiento de la sal caliente (565°C) es 965,47 m³ y el de la sal fría (290°C), 2.252,76 m³. Las temperaturas iniciales de las sales calientes (565°C) son de 574°C y de las frías 290°C.

La capacidad calorífica para el tanque de sales frías (290°C) es el equivalente a 15 MWe y para el de las sales calientes (565°C) 30 MWe. Mediante todos estos datos se obtiene una eficiencia en el calentamiento de 0.99.

Los parámetros que se presentan después de los anteriores no se tienen en cuenta por tratarse de los correspondientes al uso de un solo depósito con la tecnología “*Thermocline*”.

Todos estos valores se encuentran resumidos en el cuadro inferior correspondiente a la Figura 1.28.

Storage System					
Storage type Two Tank					
Full Load Hours of TES	15	hours	Initial Hot HTF Temp.	574	°C
Storage Tank Volume	3218.23	m ³	Initial Cold HTF Temp.	290	°C
Tank Diameter	14.3136	m	Initial Hot HTF Percent	30	%
Tank Height	20	m	Initial Hot Storage Volume	965.47	m ³
Tank Fluid Min. Height	1	m	Initial Cold Storage Volume	2252.76	m ³
Parallel Tank Pairs	1		Cold Tank Heater Temp. Set-Point	280	°C
Min Storage Volume	160.912	m ³	Cold Tank Heater Capacity	30	MWe
Max Storage Volume	3057.32	m ³	Hot Tank Heater Temp. Set-Point	500	°C
Wetted Loss Coefficient	0.4	Wt/m ² -K	Hot Tank Heater Capacity	30	MWe
Dry Loss Coefficient	0.25	Wt/m ² -K	Tank Heater Efficiency	0.99	
Enable storage bypass valve <input checked="" type="checkbox"/>					
Thermocline Parameters					
Void fraction	0.25	0..1	Filler material	Quartzite	
Minimum discharge outlet temp	500	°C	Filler material specific heat	1.105	kJ/kgK
Maximum charge outlet temp	400	°C	Filler material density	2640	kg/m ³
			Number of nodes for thermocline	100	

Figura 1.28: Datos obtenidos para el sistema de almacenamiento de la planta de 19 MWe seleccionada.
Fuente: Software SAM (NREL)

En el apartado correspondiente al consumo de energía parasitaria figuran factores como la eficiencia de la bomba del receptor para el HTF con un valor de 0,85. La potencia requerida para la bomba de impulsión del HTF hacia el bloque de potencia es de 0,55 KJ/Kg.

En cuanto al apartado de conductos de la planta se obtiene una longitud de 387,531 m. a partir de un factor multiplicador de la longitud de los conductos de 2,6. El coeficiente de pérdidas de las tuberías es de 10.200 W/m resultando unas pérdidas totales en los conductos de 3.952,82 kW_t.

El consumo de equipos auxiliares como son los calentadores, intercambiador etc. es de 0,460 MW_e.

Estos valores se reflejan en la tabla inferior correspondiente a la Figura 1.29.

Parasitic Energy Consumption									
Receiver HTF Pump Efficiency	0.85	Piping Loss Coefficient	10200 Wt/m						
Fraction of rated gross power consumed all times	0.0055 MWe/MWcap	Piping Length Constant	0 m						
Required pumping power for HTF through power block	0.55 kJ/kg	Piping Length Multiplier	2.6						
Required pumping power for HTF through storage	0.15 kJ/kg	Total Piping Length	387.583 m						
		Total Piping Loss	3953.35 kWt						
		Factor	Coeff 0	Coeff 1	Coeff 2				
Balance of plant parasitic	0 MWe/MWcap	1	0	0.483	0	BOP	0 MWe		
Aux heater, boiler parasitic	0.023 MWe/MWcap	1	0.483	0.571	0	Aux	0.460598 MWe		

Figura 1.29: Datos obtenidos desde el apartado de consumo de energía parasitaria para la planta de 19 MW_e.
Fuente: SAM (NREL)

Para el apartado correspondiente al receptor y la torre, valores en la Figura 1.30, se obtiene mucha información y de gran importancia. La aplicación SAM optimiza tanto la altura de la torre como el diámetro del receptor a partir del menú del campo solar obteniéndose los siguientes datos. SAM nos aporta la altura óptima del receptor elegido (cilíndrico) y es de 12,80 m., su diámetro 8,81 m. y el número de paneles de tubos que es 20.

Dentro de las propiedades de transferencia de calor en el receptor se obtienen datos de los conductos por los que circula el fluido térmico y las características del aislamiento. Para los conductos, SAM determinó un diámetro exterior de 40 mm. Con un espesor de pared de 1,25 mm. La emitancia del recubrimiento arroja un valor de 0,88 mientras que la absorbancia es de 0,94. Como factor de pérdidas térmicas 1.

Mediante el apartado de diseño de operaciones se observa que el retardo para la puesta en funcionamiento del receptor es de 12 minutos ya que la temperatura de salida requerida, de las sales del receptor, ha de ser de 574°C. El flujo máximo de las sales a través del receptor presenta un valor de 310,406 kg/s y la potencia térmica de diseño es de 110, 68 MW_t.

En cuanto a los materiales y sales que se han tenido en cuenta para el funcionamiento de la central, se han tomado los que presenta el software por defecto como son el acero inoxidable AISI 316 para los componentes metálicos, aunque para este caso será utilizada la aleación rica en Ni, INCONEL 617 y como fluido caloportador la “sal solar binaria” tanto para almacenamiento térmico como para HTF.

Entre los parámetros del modelado del flujo en el receptor se toma como flujo máximo el valor de 1.000 kWt/m^2 .

External Receiver		Materials and Flow	
Receiver Height <input type="text" value="12.7979"/> m		HTF Type <input type="text" value="Salt (60% NaNO3 40% KNO3)"/>	
Receiver Diameter <input type="text" value="8.80852"/> m		Property table for user-defined HTF <input type="button" value="Edit..."/>	
Number of Panels <input type="text" value="20"/>		Material Type <input type="text" value="Stainless AISI316"/>	
		Flow Pattern <input type="text" value="1"/>	
Receiver Heat Transfer Properties		Receiver Flux Modeling Parameters	
Tube Outer Diameter <input type="text" value="40"/> mm		Max Receiver Flux <input type="text" value="1000"/> kWt/m2	
Tube Wall Thickness <input type="text" value="1.25"/> mm		Estimated receiver heat loss <input type="text" value="0.0"/> kWt/m2	
Coating Emittance <input type="text" value="0.88"/>		Receiver flux map resolution <input type="text" value="20"/>	
Coating Absorptance <input type="text" value="0.94"/>		No. days in flux map lookup <input type="text" value="8"/>	
Heat Loss Factor <input type="text" value="1"/>		Hourly frequency in flux map lookup <input type="text" value="2"/> hrs	
Design Operation		Tower Dimension	
Solar multiple <input type="text" value="2.4"/>		Tower Height <input type="text" value="149.071"/> m	
Min. receiver turndown fraction <input type="text" value="0.25"/>			
Max receiver operation fraction <input type="text" value="1.2"/>			
Receiver startup delay time <input type="text" value="0.2"/> hr			
Receiver startup delay energy fraction <input type="text" value="0.25"/>			
Required HTF Outlet Temp <input type="text" value="574"/> C			
Max Flow Rate to Receiver <input type="text" value="310.406"/> kg/s			
Receiver design thermal power <input type="text" value="110.68"/> MWt			

Figura 1.30: Datos obtenidos para la torre y el receptor de la planta de 19 MW_e seleccionada.

Fuente: Software SAM (NREL)

A modo de resumen, mediante la Figura 1.31 se observan los datos de producción energética anual en condiciones óptimas de funcionamiento, que presenta unos valores de $44.512.632 \text{ kW}_h$ con los precios de la energía generada expresados en centavos de dólar, aunque estos datos no se han tenido en consideración dado que no pertenecen al objetivo de esta tesis.

Metric	Value
Annual energy	44,512,632 kWh
Capacity factor	30.7%
Gross-to-net conversion	84.1 %
PPA price (year 1)	38.29 ¢/kWh
PPA Price Escalation	1.00 %
Levelized PPA price (nominal)	50.35 ¢/kWh
Levelized cost (nominal)	34.72 ¢/kWh
Investor IRR (after-tax)	11.69 %
Year investor IRR acheived	6 %
Investor NPV (after-tax)	\$4,842,045
Developer IRR (after-tax)	NaN
Developer NPV (after-tax)	\$71,731,920
Initial cost	\$194,818,592
Initial cost less cash incentives	\$194,818,592
Equity	\$43,328,932
Debt	\$151,489,664
Debt fraction	77.76 %
Minimum DSCR	1.30

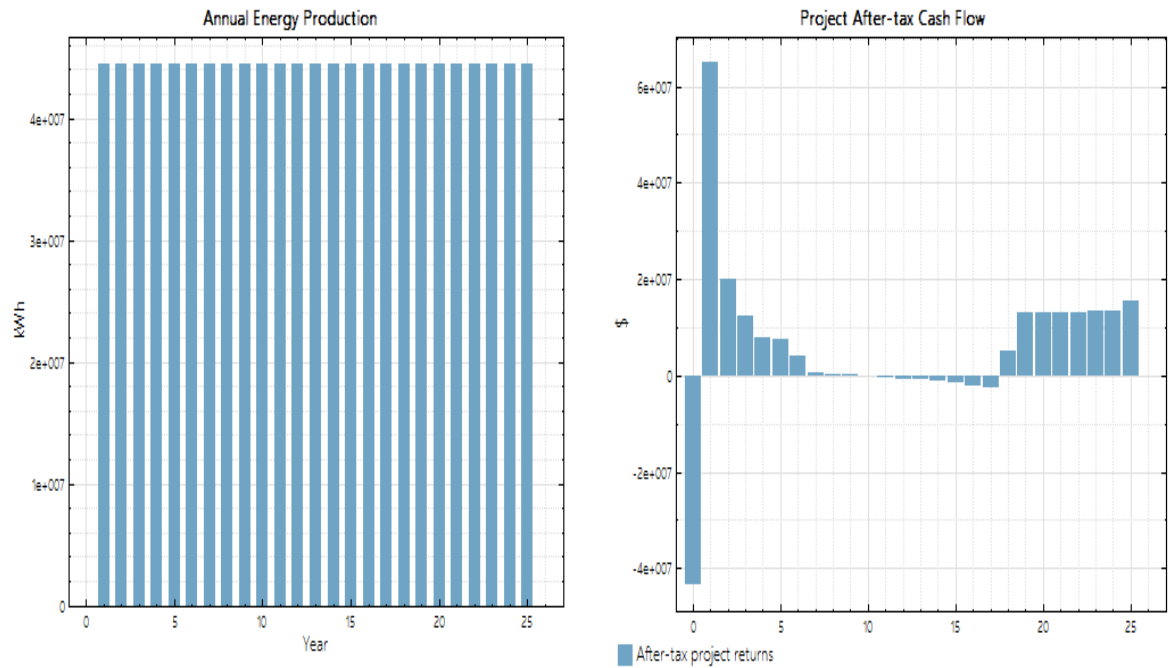


Figura 1.31: Datos económicos y de producción energética a 25 años para la planta de 19 MW_e.
Fuente: SAM (NREL)

- Planta CSP de receptor central de 100 MW_e

Al igual que en el caso anterior, se ha tomado como ubicación de la central el mismo teniendo en cuenta la base de datos existente en SAM y se obtuvieron los siguientes valores presentados en la Figura 1.32:

The screenshot displays the SAM software interface with the following data:

Field	Value
City	Sevilla
State	ESP
Country	Spain
Time zone	GMT 1
Elevation	31 m
Latitude	37.42 °N
Longitude	-5.9 °E
Data Source	IWEC
Station ID	083910
Data file	D:\SAM\2015.6.30\solar_resource\Spain ESP Sevilla (INTL).csv

Tools:

- View hourly data...
- Refresh library
- Folder settings...
- Open library folder...

-Annual irradiance and temperature summary

Parameter	Value	Unit
Global horizontal	NaN	kWh/m ² /day
Direct normal (beam)	4.86	kWh/m ² /day
Diffuse horizontal	1.75	kWh/m ² /day
Average temperature	18.4	°C
Average wind speed	2.7	m/s

[Visit SAM weather data website](#)

Download a weather file from NREL Solar Prospector

[Download...](#) Click Download and type a street address or coordinates (continental United States only) to download a weather file from the NREL Solar Prospector database. SAM will add the file to the solar resource library and display it in the list above. [Visit Solar Prospector website](#)

Figura 1.32: Datos geográficos y de radiación anual y temperatura media de la ubicación de la planta de potencia 100 MW_e
Fuente: SAM (NREL)

Como se puede observar, se toman los mismos valores de temperatura media anual (18,4°C) y velocidad del viento de 2,7 m/s respetando las mismas condiciones que en el caso anterior en la central de 17 MW_e.

Para este caso, en el aparatado de capacidad de la planta, se introdujo el valor de la potencia de salida de la turbina deseada 100 MW_e para unos requerimientos de almacenamiento térmico de 15 horas, obteniendo una potencia estimada de salida para el diseño, de 87 MW_e. La potencia térmica de diseño corresponde a 242,7 MW_t y control de planta determinado para un inicio de operaciones al alcanzar los 500°C que se estima en media hora. Se ha considerado que la tecnología utilizada en el ciclo de potencia es la correspondiente a un ciclo Rankine operando a una presión de 100 bares mediante condensador híbrido considerando una temperatura ambiente de diseño de 43°C como se muestra en la Figura 1.33:

Plant Capacity	
Design Turbine Gross Output	100 MWe
Estimated Gross to Net Conversion Factor	0.87
Estimated Net Output at Design (Nameplate)	87 MWe
Parasitic losses typically reduce net output to approximately 90 % of design gross power	

Availability and Curtailment	
Curtailment and availability factors are annual or hourly factors that modify system output to represent system outages or other events.	<div>Edit losses...</div> <div>Annual loss: 4.0 %</div> <div>Hourly losses: None</div> <div>Custom periods: None</div>

Power Block Design Point	
Rated Cycle Conversion Efficiency	0.412
Design Thermal Power	242.718 MWt
Design HTF Inlet Temp.	574 °C
Design HTF Outlet Temp.	290 °C
Fossil Backup Boiler LHV Efficiency	0.9
Aux heater outlet set temp	594 °C
Fossil Dispatch Mode	Minimum backup level

Plant Control	
Min. Required Temp. For Startup	500 °C
Low-resource Standby Period	2 hours
Fraction of Thermal Power Needed for Standby	0.2
Power Block Startup Time	0.5 hours
Fraction of Thermal Power Needed for Startup	0.5
Min Turbine Operation	0.25
Max Turbine Over Design Operation	1.05

Cycle Technology-Dependent Inputs	
Boiler Operating Pressure	100 Bar
Steam cycle blowdown fraction	0.02
Turbine Inlet Pressure Control	Fixed pressure
Condenser Type	Hybrid
Ambient Temp at Design	43 °C
ITD at Design Point	16 °C
Ref. Condenser Water dT	10 °C
Approach Temperature	5 °C
Condenser Pressure Ratio	1.0028
Min condenser pressure	2 inHg
Cooling system part load levels	8
<div>Hybrid dispatch control parameters refer to the dispatch periods defined on the thermal storage page.</div>	

Hybrid Dispatch	
Period 1:	0
Period 2:	0
Period 3:	0
Period 4:	0
Period 5:	0
Period 6:	0
Period 7:	0
Period 8:	0
Period 9:	0

Figura 1.33: Datos obtenidos de la capacidad de la planta de 100 MWe para el diseño del bloque de potencia, control de planta y tecnología del ciclo.

Fuente: Software SAM (NREL)

El campo solar se generó de forma automática respetando los parámetros introducidos inicialmente para conseguir los requisitos comentados resultando de ello 7.107 heliostatos con los siguientes valores que se muestran en la Figura 1.34 y que corresponden al número de heliostatos necesarios en la planta, su distribución y coordenadas de acuerdo a un posicionamiento norte-sur para el eje y de la figura superior derecha del campo solar y este-oeste para el eje x del mismo, como se puede observar en dicha figura. Se ha dejado a elección del programa informático, la selección del tipo de heliostato con sus dimensiones y suponiendo un método de enfoque ideal.

El uso de terreno correspondiente a la totalidad de la planta es de 5,68 Km², la superficie ocupada por el área total reflectiva de los heliostatos es de 1,026 Km² y para el resto de campo no solar es de 182.109 m².

En el apartado de las limitaciones de disposición de campo solar se obtuvieron los siguientes valores:

- Altura de la torre con el receptor: 195,43 m.
- Máxima distancia de los heliostatos a la torre: 1.661,1 m.
- Mínima distancia de los heliostatos a la torre: 146,57 m.

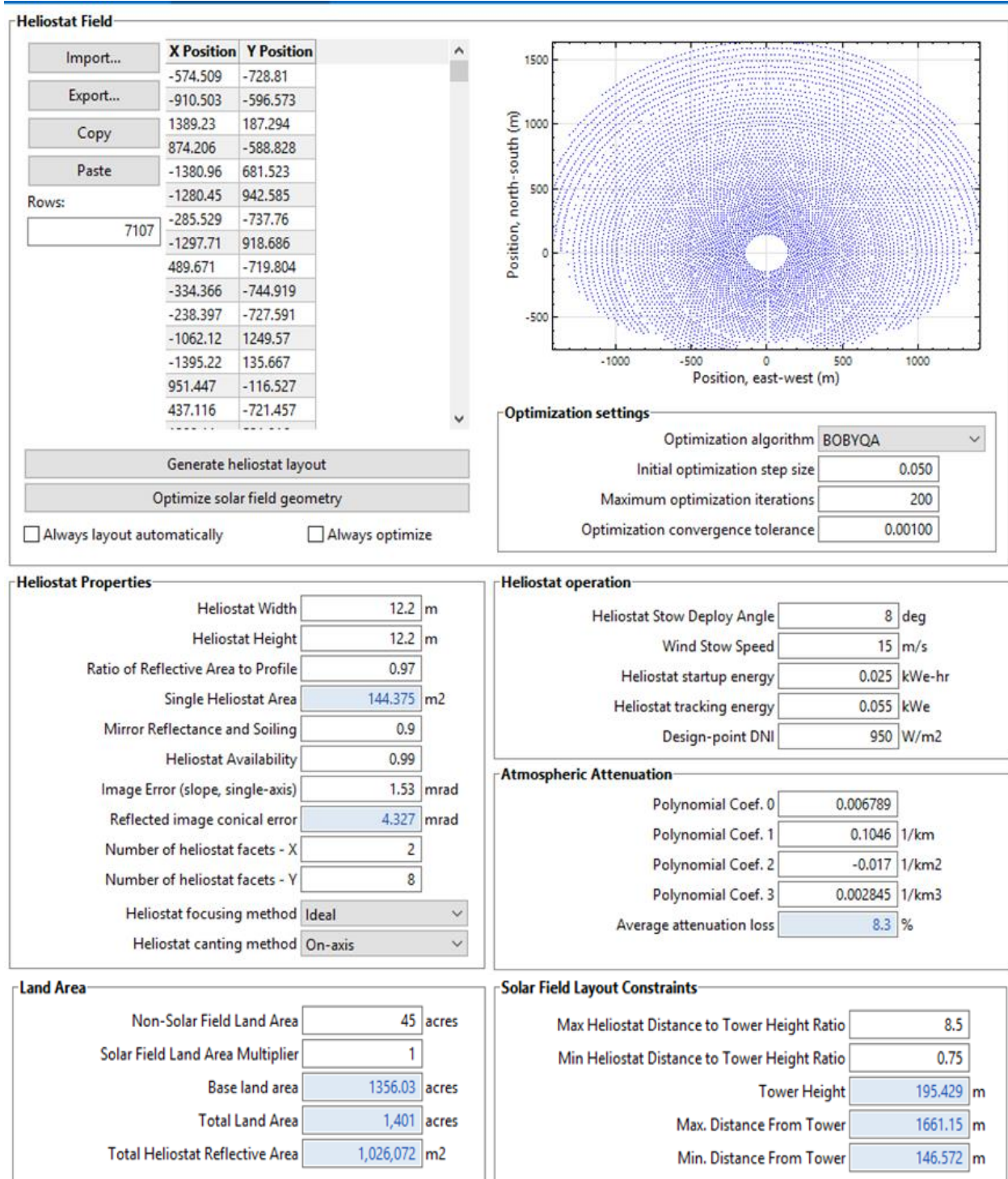


Figura 1.34: Datos obtenidos para el campo solar, propiedades de heliostatos uso del terreno y características relacionadas con ello para una central termosolar de 100 MW_e.

Fuente: Software SAM (NREL)

Para el sistema de almacenamiento térmico se eligió un período de 15 horas para lo cual se obtuvo un volumen necesario para el tanque de almacenamiento de 16.938,1 m³. Las dimensiones del tanque corresponden a un diámetro de 32,83 m. y una altura de

20 m. La altura mínima del contenido en sales en el tanque es de 1 m. para un volumen mínimo de almacenamiento de sales de 846,903 m³ y el volumen máximo 16.901,2 m³.

Una vez iniciados los ciclos de trabajo en la planta, el volumen inicial de almacenamiento de la sal caliente (565°C) es 5.081,42 m³ y el de la sal fría (290°C) 11.856,6 m³. Las temperaturas iniciales de las sales calientes (565°C) son de 574°C y de las frías 290°C.

La capacidad calorífica para el tanque de sales frías (290°C) es el equivalente a 30 MW_e y para el de las sales calientes (565°C) 30 MW_e. Mediante todos estos datos se obtiene una eficiencia en el calentamiento de 0.99.

Los parámetros que se presentan después de los anteriores no se tienen en cuenta por tratarse de los correspondientes al uso de un solo depósito con la tecnología “*Thermocline*”.

Todos estos valores se encuentran resumidos en el cuadro inferior correspondiente a la Figura 1.35.

Storage System					
Storage type Two Tank					
Full Load Hours of TES	15	hours	Initial Hot HTF Temp.	574	°C
Storage Tank Volume	16938.1	m ³	Initial Cold HTF Temp.	290	°C
Tank Diameter	32.8376	m	Initial Hot HTF Percent	30	%
Tank Height	20	m	Initial Hot Storage Volume	5081.42	m ³
Tank Fluid Min. Height	1	m	Initial Cold Storage Volume	11856.6	m ³
Parallel Tank Pairs	1		Cold Tank Heater Temp. Set-Point	280	°C
Min Storage Volume	846.903	m ³	Cold Tank Heater Capacity	30	MWe
Max Storage Volume	16091.2	m ³	Hot Tank Heater Temp. Set-Point	500	°C
Wetted Loss Coefficient	0.4	Wt/m ² -K	Hot Tank Heater Capacity	30	MWe
Dry Loss Coefficient	0.25	Wt/m ² -K	Tank Heater Efficiency	0.99	
			Enable storage bypass valve	<input checked="" type="checkbox"/>	
Thermocline Parameters					
Void fraction	0.25	0..1	Filler material	Quartzite	
Minimum discharge outlet temp	500	°C	Filler material specific heat	1.105	kJ/kgK
Maximum charge outlet temp	400	°C	Filler material density	2640	kg/m ³
			Number of nodes for thermocline	100	

Figura 1.35 Datos obtenidos para el sistema de almacenamiento de la planta de 100 MW_e seleccionada.
Fuente: Software SAM (NREL)

Para el apartado correspondiente al receptor y la torre, valores en la Figura 36, la aplicación SAM optimiza tanto la altura de la torre como el diámetro del receptor para esta potencia, partir del menú del campo solar obteniéndose los siguientes datos. SAM nos aporta la altura óptima del receptor elegido (cilíndrico) y es de 21,46 m., su diámetro 17,2 m. y el número de paneles de tubos que es 20.

Dentro de las propiedades de transferencia de calor en el receptor se obtienen datos de los conductos por los que circula el fluido térmico y las características del aislamiento. Para los conductos, SAM determinó un diámetro exterior de 60 mm. Con un espesor de pared de 1,70 mm. La emitancia del recubrimiento arroja un valor de 0,88 mientras que la absorbancia es de 0,94. Como factor de pérdidas térmicas 1.

Mediante el apartado de diseño de operaciones se observa que el retardo para la puesta en funcionamiento del receptor es de 12 minutos ya que la temperatura de salida requerida, de las sales del receptor, ha de ser de 574°C. El flujo máximo de las sales a través del receptor presenta un valor de 1.633,71 Kg/s y la potencia térmica de diseño es de 582,52 MW_t.

En cuanto a los materiales y sales que se han tenido en cuenta para el funcionamiento de la central, se han tomado los que presenta el software por defecto como son el acero inoxidable AISI 316 para los componentes metálicos, aunque en este caso será utilizada la aleación rica en níquel INCONEL 617 y como fluido caloportador la “sal solar binaria” tanto para almacenamiento térmico como para HTF.

Entre los parámetros del modelado del flujo en el receptor se toma como flujo máximo el valor de 1.000 KW_t/m², suponiendo unas pérdidas térmicas en el receptor de 0 KW_t/m².

External Receiver
Receiver Height and Receiver Diameter can be optimized using the 'Optimize solar field geometry' button on the Heliostat Field page

Receiver Height m

Receiver Diameter m

Number of Panels

Receiver Heat Transfer Properties

Tube Outer Diameter mm

Tube Wall Thickness mm

Coating Emittance

Coating Absorptance

Heat Loss Factor

Design Operation

Solar multiple

Min. receiver turndown fraction

Max receiver operation fraction

Receiver startup delay time hr

Receiver startup delay energy fraction

Required HTF Outlet Temp C

Max Flow Rate to Receiver kg/s

Receiver design thermal power MWt

Materials and Flow

HTF Type

Property table for user-defined HTF

Material Type

Flow Pattern

Receiver Flux Modeling Parameters

Max Receiver Flux kWt/m2

Estimated receiver heat loss kWt/m2

Receiver flux map resolution

No. days in flux map lookup

Hourly frequency in flux map lookup hrs

Tower Dimension

Tower Height m

Figura 1.36: Datos obtenidos para la torre y el receptor de la planta de 100 MW_e seleccionada.

Fuente: Software SAM (NREL)

En cuanto al apartado de conductos de la planta se obtiene una longitud de 508,115 m. a partir de un factor multiplicador de la longitud de los conductos de 2,6. El coeficiente de pérdidas se considera como 10.200 W_t/m resultando unas pérdidas totales en los conductos de 5.182,77 KW_t.

El consumo de equipos auxiliares como son los calentadores, intercambiador etc. es de 2,242 MW_e.

Estos valores se reflejan en la tabla inferior correspondiente a la Figura 1.37.

Parasitic Energy Consumption

Receiver HTF Pump Efficiency

Fraction of rated gross power consumed all times MWe/MWcap

Required pumping power for HTF through power block kJ/kg

Required pumping power for HTF through storage kJ/kg

Piping Loss Coefficient Wt/m

Piping Length Constant m

Piping Length Multiplier

Total Piping Length m

Total Piping Loss kWt

	Factor	Coeff 0	Coeff 1	Coeff 2	
Balance of plant parasitic	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.483"/>	<input type="text" value="0"/> MWe
Aux heater, boiler parasitic	<input type="text" value="0.023"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0.483"/>	<input type="text" value="0.571"/>	<input type="text" value="2.242"/> MWe

BOP MWe

Aux MWe

Figura 1.37: Datos obtenidos desde el apartado de consumo de energía parasitaria para la planta de 100 MW_e.

Fuente: SAM (NREL)

A modo de resumen, mediante la Figura 1.38 se observan los datos de producción energética anual en condiciones óptimas de funcionamiento, que presenta unos valores de 289.911.648 KWh con los precios de la energía generada expresados en centavos de dólar, aunque estos datos no se han tenido en consideración dado que no pertenecen al objetivo de esta tesis.

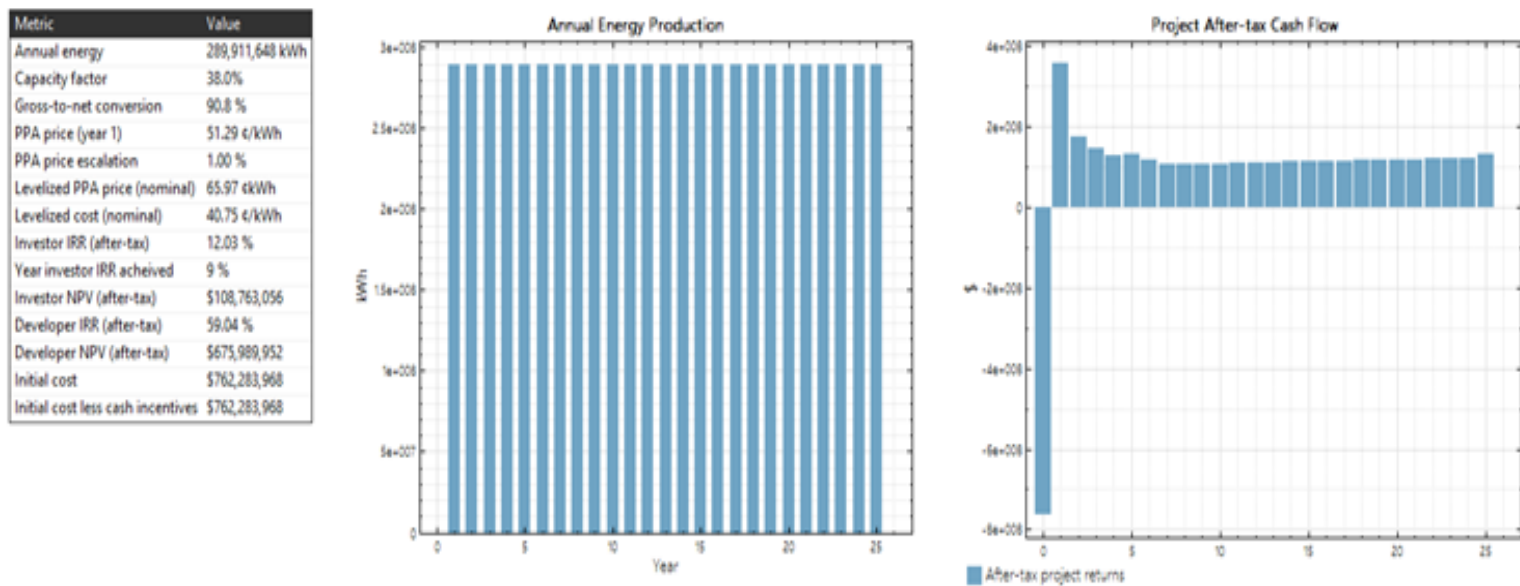


Figura 1.38: Datos económicos y de producción energética a 25 años para la planta de 100 MW_e.
Fuente: SAM (NREL)



ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

La energía solar siempre ha atraído el interés de científicos por su disponibilidad y en la actualidad, debido al aumento continuo de la demanda energética y la necesidad de plantas de energía respetuosas con el medio ambiente, es cada vez mayor la atención que se presta a las tecnologías de energía solar, por la posibilidad de convertir la energía solar en energía eléctrica.

La tecnología desarrollada mediante la energía solar térmica utiliza la conversión directa o indirecta en energía eléctrica por medio de ciclos termodinámicos. Aunque la evaluación económica de esta tecnología es lo más relevante para las futuras decisiones inversoras, es interesante hacer una comparación entre diferentes plantas de la misma tecnología, pero con diferente potencia, basada en los diferentes impactos y daños ambientales.

Las Plantas CSP con almacenamiento térmico utilizan generalmente sales fundidas. Las primeras experiencias de receptor de torre central con almacenamiento térmico mediante sales fundidas datan de 1984 siendo la Planta termosolar THEMIS de 2 MW_e en Francia y una de 1 MW_e en USA¹³⁸, ambas con almacenamiento térmico indirecto.

En el año 1996 surge, en USA, la central termosolar Solar Two de 10 MW con primer sistema con almacenamiento térmico mediante sales fundidas directo con una capacidad de almacenamiento de 3 horas fue a partir de ella cuando comenzó el desarrollo de esta tecnología.

En el año 2008 entró en operación el segundo sistema de receptor central de torre mediante almacenamiento térmico, GEMASOLAR, en España con una capacidad de producción de 17 MW_e con capacidad de almacenamiento para 15 horas siendo la primera que operó comercialmente utilizando para el sistema de almacenamiento térmico la Sal Solar Binaria (mezcla eutéctica de NaNO₃ y KNO₃) siendo la base de nitratos y nitritos en la que se apoyan la mayoría de los compuestos para almacenamiento térmico.

¹³⁸ Dunn R., Hearps P., Wright M. "Molten-Salt Power Towers: Newly Commercial Concentrating Solar Storage". IEEE, N°100, pág.504-515, 2012.

Sin embargo, las disponibilidades de las sales de nitratos en el mundo pertenecen a las minas en explotación de Perú y Chile de tal manera que, en base al desarrollo previsto para esta tecnología, la previsión es que para el año 2050 sería precisa una cantidad 30 veces superior a la producción actual de estos países, por ello la incesante búsqueda de nuevos compuestos baratos y con propiedades que mejoren las de estos compuestos.

Por otro lado, y mientras que las sales utilizadas para el almacenamiento térmico se encuentran limitadas por sus propiedades térmicas en cuanto a su estabilidad a elevada temperatura, los materiales que van a estar en contacto con ellas son un capítulo a tener en cuenta por las elevadas temperaturas de trabajo.

Desde principios de los años 80 se han construido muchas plantas experimentales, con la tecnología de torre, por todo el mundo y se hicieron para demostrar su aptitud en cuanto a la generación de energía eléctrica y han ido evolucionando en cuanto a las mejoras de los diferentes equipos que componen dichas plantas.

Como se explicó anteriormente, esta tecnología se basa en el seguimiento de la radiación solar a través de unos heliostatos (espejos) de tal manera que la luz solar es reflejada hacia un receptor central situado en la parte superior de una torre que se encuentra en el centro del campo solar. La tecnología de las centrales termosolares de receptor de torre central es menos madura que la de colectores cilindro-parabólico pero la ventaja de las de receptor central de torre es que pueden alcanzar temperaturas de trabajo más altas permitiendo la generación y el almacenaje de energía, con mayor eficiencia y a un menor costo. A parte de la generación de energía eléctrica, la energía calorífica, puede ser utilizada en diversos procesos industriales como en el proceso de generación de H_2 a bajo coste (inferior al de electrolisis) o en la industria metalúrgica.

Desde el año 2014 y mediante esta tecnología, se han generado 500 MWe¹³⁹ de potencia instalada.

En un futuro, los avances tecnológicos de las centrales termosolares de receptor central de torre, podría convertirlas en la más aceptada ya que permiten trabajar a elevadas temperaturas con pérdidas asumibles gracias al uso de sales fundidas como fluido de transferencia permitiendo por tanto mayor eficiencia del ciclo de vapor y la reducción del costo en el almacenamiento de energía al posibilitar un diferencial térmico más elevado.

¹³⁹ CSP Today. "CSP Solar Tower Report 2014: Cost, Performance and Thermal Storage", Technical Report, FC Business Intelligence, 2013.

Por tanto, su principal ventaja con respecto a otras tecnologías de generación de energía eléctrica es la posibilidad de satisfacer los picos de demanda y cargas intermedias gracias al proceso de almacenamiento térmico en períodos de ausencia de radiación solar.

Los criterios seguidos a la hora de optimizar el rendimiento energético se basan en la reducción de los costes de mantenimiento de las diferentes operaciones de planta y, sobre todo, en el empleo de nuevos materiales y fluidos de transferencia térmica que permitan un mayor rendimiento y sean más respetuosos con el medio ambiente.

Se han realizado diferentes estudios referidos al Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para diferentes tecnologías y están disponibles en la literatura científica como Burkhardt et al.¹⁴⁰, dónde se puede consultar una extensa bibliografía sobre ACV respecto a diferentes plantas CSP a escala comercial centrándose en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Por otro lado, algunos autores¹⁴¹ sin embargo, llevan a cabo una evaluación tecnológica de las CSP, así como el costo y el impacto ambiental hasta el año 2050.

Todos los estudios aportan beneficios sustanciales de estas tecnologías en términos de impacto global, en relación con otros sistemas de generación de energía eléctrica convencionales.

Respecto al estudio de ACV de materiales y fluidos térmicos en centrales termosolares CSP existe poca documentación sobre la que apoyarse debido a la complejidad de los diferentes sistemas y la diversidad de ellos en cada uno como se puede apreciar en la disparidad de datos aportados por diferentes autores como Burkhardt, Lechón, Viebahn etc. que en lo que sí coinciden es que el período de amortización de las plantas CSP es de aproximadamente un año y una vida útil de treinta años y medioambientalmente registran una huella ecológica menor que otras tecnologías basadas en la obtención de energía eléctrica mediante combustibles fósiles aunque los costes (KWh) de su construcción son más elevados que en las plantas de generación mediante combustibles fósiles de potencia equivalente, así como la huella hídrica que puede

¹⁴⁰ Burkhardt III John J., Heath G., Cohen E., “*Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation - Systematic Review and Harmonization*”, Journal of Industrial Ecology, N°16, S1, S93–S109. 2012.

¹⁴¹ Viebahn P., Lechón Y., Trieb F. *The Potential Role of Concentrated Solar Power (CSP) in Africa and Europe — A Dynamic Assessment of Technology Development, Cost Development and Life Cycle Inventories until 2050*”, Energy Policy, N°39, pág.4420-4430, 2011.

reducirse hasta en un 90% cambiando el tipo de enfriamiento a seco, modificaciones que ya han sido tenidas en cuenta en el ACV propuesto por algunos autores¹⁴².

Otro aspecto a tener en cuenta es la limitación de los materiales y compuestos utilizados en este estudio de tal manera que las sales podrían ser un compuesto restrictivo debido a las pequeñas reservas naturales de ellas siendo preciso la producción de las mismas de forma sintética, no es el caso para el acero y hormigón¹⁴³.

2.1.- Instalaciones CSP de receptor central de torre

En el presente apartado se van a indicar de forma breve las principales instalaciones de receptor central de torre, operativas y en fase de construcción, así como sus características más destacadas y su configuración. Los datos obtenidos corresponden a los mostrados por NREL (National Renewable Energy Laboratory).

ACME Solar Tower:

Esta instalación se encuentra ubicada en la ciudad de Bikaner, en la región de Rajasthan de India ocupando una extensión de 48.500 m². Comenzó a operar en abril del año 2011 y su propietario es la empresa ACME Group.

En cuanto a la configuración de la planta destaca el campo de heliostatos con 14.280 unidades ocupando un área de 16.222 m². La altura de la torre es de 46 m. y el fluido de transferencia térmica es agua/vapor entrando al receptor a una temperatura de 218°C y saliendo a 440°C y no presenta tecnología alguna de almacenamiento térmico.

El bloque de potencia presenta una turbina con una capacidad de producción de energía eléctrica de 2.5 MW_e con torre de enfriamiento y sistema de refrigeración húmedo. En la actualidad se encuentra operativa.

ASHALIM Plot B:

Instalación comercial que se encuentra en construcción en la localidad de Ashalim, en la región del desierto del Negev de Israel cuyos propietarios son las empresas Alstom, BrightSource Energy y NOY Infraestructure & Energy Investment Fund y se estima que comience a operar en el año 2017.

¹⁴² Burkhardt JJ, Heath GA, Turchi CS. “Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and the Impacts of Key Design Alternatives”. Environmental Science & Technology, 2011.

¹⁴³ García-Olivares A., Ballabrera Poy J., García Ladona E., Turiel A. “A Global Renewable Mix with Proven Technologies and Common Materials”. Energy Policy, pág.41-56, 2012.

La configuración de la planta consta de 50.000 heliostatos ocupando una superficie de $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ con una altura de torre de 240 m. El fluido de transferencia térmica es agua/vapor sin almacenamiento térmico.

El bloque de potencia presenta una turbina generadora de corriente eléctrica de 121 MW_e .

ATACAMA 1:

Instalación comercial bajo construcción ubicada en la ciudad de Calama perteneciente a la región de Antofagasta de Chile cuyo propietario es la empresa Abengoa Solar y que se encontrará operativa para el año 2018.

El campo solar consta de 10.600 heliostatos que ocupan una superficie de $1,48 \times 10^6 \text{ m}^2$ y la torre tiene una altura de 243 m. El fluido de transferencia térmica es de sales fundidas que entran al receptor a una temperatura de 300°C y lo abandonan a 550°C . Posee sistema de almacenamiento térmico mediante dos tanques que le proporcionarán una autonomía en ausencia de radiación solar de 17.5 horas.

El bloque de potencia posee una turbina que le proporcionará 110 MW_e .

CRESCENT DUNES Solar Energy Project:

Instalación comercial que tiene prevista su puesta en marcha en el año 2015 y se encuentra en la ciudad de Tonopah en el estado de Nevada de los Estados Unidos ocupando una superficie total de $6,5 \times 10^6 \text{ m}^2$. El propietario de la planta es la empresa SolarReserve's Tonopah Solar Energy, LLC y la empresa constructora es ACS Cobra.

El campo solar consta de 17.170 heliostatos sobre una superficie de $1,07 \times 10^6 \text{ m}^2$ y una altura de torre de casi 165 m. El tipo de receptor es cilíndrico externo y el fluido de transferencia térmica es de sales fundidas entrando en el receptor a 288°C y saliendo de él a 566°C . Posee almacenamiento térmico directo mediante dos tanques de almacenamiento que le proporcionan una autonomía de 10 horas de funcionamiento en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia tiene una turbina Alsthom que proporciona 110 MW_e de corriente eléctrica. El método de refrigeración es mixto, seco/húmedo.

DAHAN Power Plant:

Esta instalación experimental que comenzó su construcción en el año 2009 y se encuentra operativa desde el 2012 en la ciudad de Beijing de la región de Yanqing en China ocupando una extensión total de 53.000 m². El propietario de la misma es el Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences.

El campo solar está compuesto por 100 heliostatos que ocupan una extensión de 10 x 10³ m² y la altura de la torre es de 118 m. con un receptor de cóncavo y con un fluido de transferencia agua/vapor que entra al receptor a 104°C y lo abandona a 400°C. Posee 1 hora de almacenamiento térmico mediante vapor saturado/aceite.

El bloque de potencia posee una turbina con refrigeración húmeda que proporciona 1.0 MW_e con una eficiencia que se aproxima el 14% mediante apoyo de combustibles fósiles.

GEMASOLAR Thermosolar Plant:

La planta termosolar GEMASOLAR se encuentra operativa desde el año 2011 en la localidad de Fuentes de Andalucía perteneciente a Sevilla, España. Ocupa una superficie total de 195 hectáreas y el propietario es la compañía Masdar y Sener.

El campo solar presenta 2.650 heliostatos en una superficie de 304.750 m² y una torre con una altura de 140 m. El receptor es para sales fundidas con una temperatura de entrada de las sales de 290°C y la salida de 565°C. Posee almacenamiento térmico directo mediante dos tanques que le proporciona una autonomía de 15 horas.

El bloque de potencia posee una turbina que genera 19.9 MW_e con refrigeración húmeda y aporte de gas natural.

GREENWAY CSP Mersin Tower Plant:

Planta termosolar demostrativa que inició su actividad en el año 2012 y se mantiene operativa a día de hoy. Se encuentra en la ciudad de Mersin en Turquía y la compañía propietaria es Greenway CSP.

El campo solar consta de un receptor de torre en el que el fluido de transferencia térmica es agua y con almacenamiento térmico mediante sales fundidas en un único depósito de 3 fases con circulación natural y capacidad de almacenamiento para 4 Mw/h.

El bloque de potencia es capaz de generar 1.4 MW_e.

IVANPAH Solar Electric Generating System:

La planta termosolar de Ivanpah consta de 3 unidades separadas, Ivanpah 1 tiene una capacidad de 126 MW_e, y Ivanpah 2 y 3, 133 MW_e cada una. Se trata de la mayor central termosolar existente. Se encuentra en la ciudad de Primm en el estado de California, Estados Unidos y ocupa una extensión de más de 14 Km². Comenzó su construcción en el año 2010 y empezó a operar en enero de 2014. Los propietarios de la instalación son las compañías NRG Energy, BrightSource Energy y Google.

El campo solar consta de 173.500 heliostatos que ocupan una superficie de $2,6 \cdot 10^6$ m² y cada heliostato tiene dos espejos. La altura de la torre es de 140 m., con un receptor solar generador de vapor por el que circula el fluido de transferencia térmica que es agua. El agua es transferida al receptor a 249°C y lo abandona a 566°C y no tiene almacenamiento térmico.

El bloque de potencia consta de una turbina con refrigeración seca con una producción de 392 MW_e. El funcionamiento de la planta se garantiza mediante aporte de gas natural cuando hay ausencia de radiación solar.

JEMALONG Solar Thermal Station:

Esta planta termosolar se encuentra operativa desde el año 2014 en la ciudad de Jemalong, Nueva Gales del Sur, Australia ocupando un total de 10 hectáreas de terreno. Se trata de un proyecto piloto y el propietario es la empresa VAST Solar.

El campo solar consta de 3.500 heliostatos que ocupan una superficie de 15.000 m² y una torre de 30 metros de altura. El receptor trabaja con Na líquido que entra en él a 270°C y lo abandona a 560°C. Tiene almacenamiento directo de 2 tanques con Na líquido que le proporciona 3 horas de autonomía en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia tiene una turbina con refrigeración seca que genera 1.1 MW_e.

JÜLICH Solar Tower:

Es una planta piloto termosolar que comenzó su actividad en el año 2008 y se encuentra en la ciudad de Jülich en la región de Rhineland en Alemania. Ocupa una extensión de 17 hectáreas y el propietario es la compañía DLR.

El campo solar tiene de 2.153 heliostatos que ocupan una superficie de 17.650 m² y una altura de torre de 60 m. El receptor trabaja con aire como fluido de transferencia térmica recibiendo aire a temperatura ambiente y saliendo de él a 680°C. Presenta almacenamiento térmico de 1.5 horas mediante un tanque con material cerámico que guarda la temperatura procedente del vapor generado en el receptor.

El bloque de potencia tiene una turbina con refrigeración seca que genera 1.5 MW_e.

KHI Solar One:

KHI es una instalación comercial que comenzó a operar en el año 2014 y se encuentra en Upington en la región de Cabo Norte de Sudáfrica. El propietario de la planta es Abengoa Solar.

El campo solar consta de 4.120 heliostatos que ocupan una superficie de 576.800 m². La torre es de 200 m. de altura y el receptor opera con agua/vapor y dispone de almacenamiento térmico de vapor saturado en un depósito que le permite una autonomía de 2 horas de funcionamiento en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia es una turbina con refrigeración seca que proporciona una producción de 50 MW_e.

Lake Cargelligo:

Se trata de una central termosolar piloto operativa desde el año 2011 que se encuentra en Lake Cargelligo, en la región de Nueva Gales del Sur de Australia y el propietario es la empresa Graphite Energy.

El campo solar consta de 620 heliostatos que ocupan una superficie de 6.080 m². El receptor es del tipo de almacenamiento mediante grafito y opera con agua/vapor como fluido de transferencia térmica. Entrando al receptor a la temperatura de 200°C y saliendo de él a 500°C. El almacenamiento térmico se realiza mediante la tecnología de grafito.

El bloque de potencia presenta una turbina que genera 3 MW_e.

NOOR III:

Noor III es una termosolar comercial que comenzará a operar el año 2017 y se encuentra ubicada en la ciudad de Ouarzate de Marruecos. El contratista de la obra es la compañía Sener y ACWA es la empresa encargada del desarrollo de la misma.

A día de hoy, el campo solar tiene un número de heliostatos aún no determinado, así como la altura de la torre. El receptor será de sales fundidas con almacenamiento térmico directo en dos tanques de almacenamiento que le proporcionarán 8 horas de autonomía en ausencia de radiación solar.

PALEN Solar Electric Generating System:

Ubicada en Desert Center, California, USA, comenzó su construcción en el año 2013 por Abengoa Solar y empezará su actividad en el 2016. Ocupa una extensión total de 1.537 hectáreas y el propietario es la compañía BrightSource Energy.

Las características del campo solar están por determinar y no tendrá, inicialmente, sistema de almacenamiento térmico.

El bloque de potencia presenta una turbina con refrigeración seca con un condensador de aire y generará 500 MW_e.

PS 10:

Perteneciente a Abengoa Solar, fue la primera planta termosolar con el sistema de generación eléctrica de receptor central de torre con carácter comercial con heliostatos de vidrio/metal con sistema de almacenamiento térmico de tanque de vapor y receptor de vapor saturado. Esta instalación permitió el desarrollo de esta tecnología y la integración de subsistemas demostrando su gestionabilidad y reducción de costos de operación y mantenimiento. Se encuentra ubicada en la población de Sanlúcar la Mayor de Sevilla, España comenzando a ser operativa en el año 2007. Ocupa una extensión de 55 hectáreas.

El campo solar consta de 624 heliostatos que ocupan una superficie de 75.000 m² y la altura de la torre es de 115 m. y fue diseñada para reducir el impacto visual de su cuerpo relativamente estrecho, incluye un gran espacio abierto. El tipo de receptor es cóncavo y el fluido de transferencia térmica es agua, obteniendo una temperatura, a la salida del receptor, de 300°C. El almacenamiento térmico le permite mantenerla operativa

durante un período de una hora en ausencia de radiación solar y el resto del tiempo cuenta con el apoyo de gas natural para mantener la central en funcionamiento.

El bloque de potencia tiene una turbina con refrigeración húmeda mediante torre de refrigeración y genera 11.0 MW_e.

PS 20:

Se trata de la planta PS 10 implementada y mejorada, sobre todo el receptor. El propietario es Abengoa Solar y comenzó su producción el año 2009. Se encuentra en la localidad de Sanlúcar la Mayor de Sevilla y ocupa una extensión de 80 hectáreas.

El campo solar está compuesto por 1.255 heliostatos que ocupan una superficie de 150.000 m² y una torre de 165 m. de altura. El receptor es del tipo cóncavo y el fluido de transferencia térmica es agua obteniendo vapor a 300°C. Presenta almacenamiento térmico en tanque de vapor que le proporciona 1 hora de operatividad en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia tiene una turbina que genera 20 MW_e mediante refrigeración húmeda con torre de refrigeración. Para conseguir la continuidad en el funcionamiento de la planta, presenta hibridación mediante gas natural.

QINGHAI DELINGHA Solar Thermal Generation Project:

Es una central termosolar ubicada en la ciudad de Delingha en la región de Qinghai de China y ocupará una superficie total de 13 Km². El propietario es la compañía Huanghe Hydropower Development y el desarrollador BrightSource Energy and Shanghái Electric Group. Comenzará su actividad el año 2017 y actualmente no se tienen datos del campo solar, aunque sí que operará con agua/vapor como fluido de transferencia térmica y contará con almacenamiento térmico indirecto mediante sales fundidas en dos tanques que le proporcionarán una autonomía de 3.5 horas de funcionamiento en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia presentará una turbina con una capacidad de producción de 270 MW_e.

REDSTONE Solar Thermal Power Plant:

En la ciudad de Postmasburg, Sudáfrica, se encuentra esta central en construcción estimando que comience a ser operativa en el año 2018. El propietario de la central es la

compañía ACWA y se desconoce la superficie total final que ocupará, así como el número de heliostatos.

El campo solar empleará como fluido de transferencia térmica sales fundidas entrando al receptor a una temperatura de 288°C y salida a 566°C. Presentará almacenamiento térmico directo mediante sales fundidas en dos tanques que le permitirán una autonomía de 12 horas de funcionamiento en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia tendrá una turbina con una capacidad de producción de 100 MW_e con refrigeración seca.

RICE Solar Energy Project:

Ubicada en la ciudad de Rice, en la región del desierto de Mojave, California, USA, ocupa una extensión total de 5.7 Km² y se encuentra en construcción por la empresa United Technologies Corp. - Pratt Whitney Power Systems y el propietario es SolarReserve's Rice Solar Energy, LLC comenzando a operar en el año 2016.

El campo solar consta de 17.170 heliostatos sobre una superficie de 1.07×10^6 m² con una altura de torre de 165 m. El receptor es cilíndrico externo y como fluido de transferencia térmica utiliza sales fundidas que entran al receptor a 288°C y lo abandonan a 566°C. Presenta almacenamiento térmico directo mediante dos depósitos de sales fundidas con una eficiencia del 99%.

El bloque de potencia tiene una turbina con una capacidad bruta de 150 MW_e con un ciclo de vapor Rankine mediante refrigeración seca.

SIERRA SUNTOWER:

La compañía eSolar, líder mundial en CSP con la tecnología de receptor de torre central, es la propietaria de esta central que se encuentra en Lancaster, California, próxima a Los Ángeles. Lleva generando electricidad desde el año 2009.

El campo solar está constituido por 24.360 heliostatos que ocupan una superficie de 27.670 m² con una torre que alcanza los 55 m. de altura. El receptor es externo y el fluido de transferencia térmica es agua que entra en el receptor a 218°C y lo abandona a 440°C. No presenta almacenamiento térmico.

El bloque de potencia tiene una turbina con una capacidad de producción, bruta, de 5 MW_e con refrigeración húmeda mediante torres de refrigeración.

SUPCON Solar Project:

La primera fase de esta central se encuentra operativa desde el año 2013 y tiene una capacidad de 10 MW_e, la segunda fase se encuentra en desarrollo. Se encuentra ubicada en la localidad de Delingha en China y ocupa una extensión de 330 hectáreas y el propietario es la empresa SUPCON Solar.

El campo solar tiene 217.440 heliostatos que ocupan una superficie de 434.880 m² con una torre de 80 m. de altura. El fluido de transferencia térmica son sales fundidas y presenta almacenamiento térmico directo mediante dos tanques de sales fundidas que le permiten una autonomía de 2.5 horas de operatividad en ausencia de radiación solar.

El bloque de potencia tiene una turbina con una capacidad neta de 50 MW_e.

De manera resumida, se muestra la relación de las diferentes centrales termosolares operativas y bajo construcción en la tabla 2 de la parte inferior.

Centrales Operativas

<u>Nombre</u>	<u>Propietario</u>	<u>País</u>	<u>Localización</u>	<u>MW</u>	<u>Tecnología</u>	<u>Almacenamiento</u>	<u>Comienzo</u>
Greenway CSP Mersin	Greenway CSP	Turquía	Mersin	1	Torre (agua/sales)	si	2012
Gemasolar	Torresol Energy	España	Fuentes de Andalucía	19	Torre (sales)	sí	2011
Jemalong Solar	Vast Solar	Australia	Jemalong	1.1	Torre (sodio)	sí	2014
Jülich Solar Tower	DLR	Alemania	Rhineland	1.5	Torre (cerámico)	sí	2008
Khi Solar One	Abengoa Solar - IDC	Sudáfrica	Uppington	50	Torre (vapor saturado)	sí	2014
Lake Cargelligo	Graphite Energy	Australia	New South Wales	3	Torre (Core graphite)	sí	2011
PS10	Abengoa Solar	España	Sanlúcar la Mayor	11	Torre (agua/gas)	2 horas	2007
PS20	Abengoa Solar	España	Sanlúcar la Mayor	20	Torre(agua/gas)	1 hora	2009

Centrales en Construcción

<u>Nombre</u>	<u>Propietario</u>	<u>País</u>	<u>Localización</u>	<u>MW</u>	<u>Tecnología</u>	<u>Almacenamiento</u>
Atacama 1	Abengoa	Chile	Antofagasta	110	Torre Sales	si
Supcon	Supcon Solar	China	Delingha	50	Torre Sales	si
Redstone CSP	Solar Reserve/ACWA	Sudáfrica	Postmasburg	100	Torre Sales	12 horas
Kiwano (Eskom)	Eskom	Sudáfrica	Uppington	100	Torre Sales	si
Noor 3	ACWA	Marruecos	Ouarzazate	150	Torre Sales	si
Crescent Dunes (Tonopah)	Solar Reserve	USA	Nevada	110	Torre Sales	10 horas

Tabla 2.1: Tablas descriptivas de las principales centrales termosolares de receptor central de torre operativas y en construcción con diferentes tipos de almacenamiento térmico.
Fuente: NREL Power Tower Projects

2.2.- Almacenamiento térmico

El almacenamiento térmico de energía sostenido y fiable es el nexo entre la energía eléctrica y la energía solar térmica que permite disponer de energía durante los aumentos imprevistos de consumo y mejorar la economía del sistema permitiendo un incremento en la capacidad de producción¹⁴⁴.

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de generación de energía eléctrica mediante energía solar térmica operan en ciclos estacionales y diarios dependiendo de la radiación solar y su duración y es por ello el uso de sistemas de ciclo combinado mediante el aporte de gas natural u otro tipo de combustible fósil que garantiza la continuidad en el funcionamiento de la instalación¹⁴⁵.

La elección de la temperatura de almacenamiento y el funcionamiento del sistema de almacenamiento térmico dependerá de las necesidades y requisitos del sistema en cada caso y es por ello que se esté estudiando el uso de otros sistemas compatibles que permitan la optimización del sistema y que permitan completar el ciclo térmico de cara a mejorar el rendimiento y coste del sistema¹⁴⁶.

El almacenamiento de energía térmica sirve, al menos, para cinco diferentes propósitos:

- Ahorro de energía mediante el empleo de nuevas fuentes de energías renovables.
- Evitar los picos de tensión en las redes eléctricas durante los períodos de elevada demanda de energía eléctrica.
- Conservación de la energía mediante el uso de equipos de conversión energética.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Obtención de energía eléctrica de alta calidad en los propósitos de valor añadido industrial.

¹⁴⁴ Gil A., Medrano M., Martorell I., Lazaro A., Dolado P., Zalba B., and Cabeza L., "State of The Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1-Concepts, Materials and Modellization," Renewable & Sustainable Energy Reviews, N°14(1), pág.31-55, 2010.

¹⁴⁵ Wagner S.J., "Environmental and Economic Implications of Thermal Energy Storage for Concentrated Solar Power Plants" Thesis, Carnegie Mellon University, 2011.

¹⁴⁶ Steinmann W.B.J. "Analysis of Thermal Storage Systems Using Modelica," Proc. 4th International Modelica Conference, G. Schmitz, ed., Hamburg University of Technology, Hamburg, pág.331-337, 2005.

Existen dos procesos mediante los que se puede obtener el almacenamiento térmico que son el directo mediante el cual se utiliza el mismo fluido térmico para el campo solar y para el almacenamiento térmico, y el indirecto que utiliza un fluido diferente para cada propósito de tal forma que el fluido térmico se calienta en el campo solar mediante intercambiadores de calor. El principal problema que existe con el método directo es que, al utilizar sales fundidas como fluido de almacenamiento térmico, se pueden solidificar por el hecho de la disminución de su temperatura, sobre todo en horario nocturno y en días de baja radiación solar.

Las plantas CSP con almacenamiento térmico presentan un coste en la generación de electricidad menor o igual que las tecnologías sin él. Mientras existe un índice de radiación solar elevado, la energía se almacena, y cuando no la hay se extrae y se utiliza para producir electricidad. El almacenamiento de energía térmica puede elevar el factor de capacidad de una planta y así conseguir la capacidad de maximizar el valor de la electricidad generada.

Existen tres métodos de almacenamiento térmico de la energía solar, mediante calor sensible, calor latente y termoquímico, si bien es el de calor sensible el más utilizado en las plantas CSP, aunque el almacenamiento mediante calor latente y el termoquímico ofrecen una serie de ventajas que están siendo estudiadas para su implementación en futuras plantas¹⁴⁷.

El almacenamiento mediante calor sensible es, conceptualmente, la forma más simple de almacenamiento térmico. El fluido frío, contenido en un tanque aislado, se calienta a temperatura más elevada mediante el fluido caliente que se transfiere desde el campo solar. En algunas de las plantas termosolares con almacenamiento térmico, el fluido circulante por el campo solar es el mismo que el empleado en los tanques para el almacenamiento térmico lo cual evita la presencia de intercambiadores de calor entre el campo solar y el almacenamiento. Esto no sucede con el almacenamiento mediante calor latente en el que el medio de almacenamiento se somete a un cambio de fase.

¹⁴⁷ Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. and Cabeza L.F. “*State of the Art on High-Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1: Concepts, Materials and Modellization*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews N°14, pág.31-55, 2009.

Medio de Almacenamiento	Temperatura (°C)		Densidad Media (kg/m³)	Conductividad Térmica Media (W/mK)	Capacidad Calorífica Media (kJ/kgK)	Capacidad Calorífica Volumen Específico (kW _h /m³)
	Frío	Caliente				
Medio Sólido						
Aceite mineral/Arena de roca	200	300	1.700	1,0	1,30	60
Concreto Reforzado	200	400	2.200	1,5	0,85	100
NaCl sólido	200	500	2.160	7,0	0,85	150
Hierro Fundido	200	400	7.200	37,0	0,56	160
Acero Fundido	200	700	7.800	40,0	0,60	450
Ladrillos refractarios de Si	200	700	1.820	1,5	1,0	150
Ladrillos refractarios de Mg	200	1.200	3.000	5,0	1,15	600
Medio Líquido						
Aceite Mineral	200	300	770	0,12	2,6	55
Aceite Sintético	250	350	900	0,11	2,3	57
Aceite de Silicona	300	400	900	0,10	2,1	52
Sales de Nitritos	250	450	1.825	0,57	1,5	152
Sales de Nitratos	265	565	1.870	0,52	1,6	250
Sales de Carbonatos	450	850	2.100	2,0	1,8	430
Na líquido	270	530	850	71,0	1,3	80

Tabla 2.2: Propiedades físicas de materiales compuestos utilizados para el almacenamiento térmico mediante calor latente.
Fuente: Hermann U., Geyer M., and Kearney D. *Overview of Thermal Storage Systems*. 2002

Almacenamiento mediante calor latente: La energía térmica se puede almacenar isotérmicamente en algunas sustancias mediante calor latente por cambio de fase. En la actualidad, se utiliza sobre todo la transición de líquido a sólido y las sustancias utilizadas en este proceso se conocen como materiales de cambio de fase¹⁴⁸. En comparación con el almacenamiento mediante calor sensible, el de calor latente permite el almacenamiento de grandes cantidades de energía en volúmenes relativamente pequeños lo que resulta una importante reducción de los costos.

¹⁴⁸ Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. and Cabeza L.F. “*State of the Art on High-Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1: Concepts, Materials and Modellization*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°14, pág.31-55, 2009.

La baja conductividad térmica de los materiales de cambio de fase se traduce en ciclos lentos de carga y descarga lo cual es una desventaja en las aplicaciones tecnológicas¹⁴⁹. El rango de temperatura necesaria para el cambio de fase para un correcto funcionamiento estará marcado por una alta masa de calor latente, elevado calor específico y elevada conductividad térmica para las fases sólida y líquida.

Las propiedades físicas para una alta densidad energética dependen de la variación de la densidad durante el cambio de fase y bajo sobre enfriamiento de congelación.

En cuanto a las propiedades químicas se requiere una estabilidad para evitar la descomposición y compatibilidad con los materiales utilizados, atoxicidad y baja tasa de inflamabilidad. El material ha de ser barato y disponible en grandes cantidades que permitan ser almacenados¹⁵⁰.

Medio de Almacenamiento por cambio de fase	Temperatura (°C)	Densidad Media (kg/m ³)	Conductividad Térmica Media (W/mK)	Capacidad Calorífica Media (kJ/kgK)	Capacidad Calorífica Volumen Específico (kW _h /m ³)
NaNO ₃	303	2.257	0,5	200	125
KNO ₃	333	2.110	0,5	267	156
KOH	380	2.044	0,5	150	85
Na ₂ CO ₃ -BaCO ₃ -MgO	500-850	5.600	5,0	420	300
NaCl	802	2.160	5,0	520	280
Na ₂ CO ₃	854	2.533	2,0	276	194
K ₂ CO ₃	897	2.290	2,0	236	150

Tabla 2.3: Propiedades físicas de materiales compuestos utilizados para el almacenamiento térmico mediante calor latente.
Fuente: Hermann U., Geyer M. and Kearney D. *Overview of Thermal Storage Systems*. 2002.

Almacenamiento Termoquímico: Se basa en el uso de reacciones termoquímicas reversibles para el almacenamiento térmico. El calor generado por el receptor de la torre se utiliza para producir una reacción endotérmica cuyo calor se puede recuperar mediante la reacción inversa¹⁵¹. Este tipo de tecnología permite la generación de electricidad las 24

¹⁴⁹ Barlev D., Vidu R. and Stroeve P. "Innovation in concentrated solar power, *Solar Energy Materials and Solar Cells*", N°95, pág.2703-2725, 2011.

¹⁵⁰ Fernandes D., Pitie F., Caceres G. and Baeyens J. "Thermal Energy Storage: How previous findings determine current research priorities". *Energy*, N°39, pág.246-257, 2012.

¹⁵¹ Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. & Cabeza L.F. "State of the Art on High-Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1: Concepts, Materials and Modellization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, N°14, pág.31-55, 2009.

horas del día, aunque se trata de una tecnología poco madura no existiendo ninguna planta totalmente desarrollada¹⁵². Se ha investigado este tipo de almacenamiento para reacciones químicas de hidruros, sulfatos, amoníaco etc. y requieren el almacenamiento de gases a elevada presión producidos mediante la reacción endotérmica y producir con posterioridad la reacción exotérmica que libere el calor necesario para la generación de energía eléctrica¹⁵³.

Reacción	ΔH° (kJ)	T (°K)
$\text{NH}_4\text{F(s)} \leftrightarrow \text{NH}_3\text{(g)} + \text{HF(g)}$	149,3	499
$\text{Mg(OH)}_2\text{(s)} \leftrightarrow \text{MgO(s)} + \text{H}_2\text{O(g)}$	81,1	531
$\text{MgCO}_3\text{(s)} \leftrightarrow \text{MgO(s)} + \text{CO}_2\text{(g)}$	100,6	670
$\text{NH}_4\text{HSO}_4\text{(l)} \leftrightarrow \text{NH}_3\text{(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} + \text{SO}_3\text{(g)}$	337,0	740
$\text{Ca(OH)}_2\text{(s)} \leftrightarrow \text{CaO(s)} + \text{H}_2\text{O(g)}$	109,3	752
$\text{BaO}_2\text{(s)} \leftrightarrow \text{BaO(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2\text{(g)}$	80,8	1.000
$\text{Li(OH)(l)} \leftrightarrow \text{Li}_2\text{O(s)} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O(g)}$	56,7	1.000
$\text{CaCO}_3\text{(s)} \leftrightarrow \text{CaO(s)} + \text{CO}_2\text{(g)}$	178,1	1.110
$\text{MgSO}_4\text{(s)} \leftrightarrow \text{MgO(s)} + \text{SO}_3\text{(g)}$	287,6	1.470

Tabla 2.4: Ejemplos de reacciones químicas reversibles para el almacenamiento termoquímico.
Fuente: Wyman, C., March 1979. *Thermal Energy Storage for Solar Applications: An Overview*.
Seri/TR-34-089, Solar Energy Research Institute

Las desventajas de este tipo de almacenamiento térmico se deben, sobre todo, a sus propiedades termodinámicas, la cinética de las reacciones químicas, su elevado costo, inflamabilidad y toxicidad.

2.2.1.- Almacenamiento térmico mediante sales fundidas

El empleo de sales fundidas en las plantas solares de concentración permite, mediante el trabajo en ciclos a elevada temperatura, la reducción de los costes de operación y la mejora en la eficiencia de las plantas. Las plantas que operan de forma indirecta, mediante un HTF orgánico como son los aceites sintéticos, tienen limitada su operatividad a una temperatura inferior a los 400°C mientras que el uso de sales fundidas

¹⁵² Glatzmaier G. "Summary Report for Concentrating Solar Power Thermal Storage Workshop". Technical report, NREL/TP-5500-52134, 2011.

¹⁵³ Romero-Paredes H., Flamant G., Abanades S., Charvin P. and Ambriz J.J. "Thermochemical Storage of Solar Energy by means of Sulfates: A review". Proceedings of the 13th SolarPACES Conference, Seville, 2006.

permite llegar hasta los 565°C y por lo tanto aumentar la eficiencia en el ciclo de vapor entre otras ventajas.

La denominación de sal fundida se debe a que a temperatura y presión ambiente son sólidos y están compuestas, principalmente, por mezclas de nitratos de sodio y potasio. Actualmente, se ha considerado el uso de sales fundidas como medio HTF y a la vez como medio de almacenamiento permitiendo un diseño de planta más eficiente.

Las sales son unos compuestos baratos, de elevada densidad y con la capacidad de absorber más energía por unidad de volumen que los aceites sintéticos HTF tradicionales. Se puede utilizar un tanque de almacenamiento de mayor tamaño para la expansión cuando el fluido está caliente y para un almacenamiento a corto plazo evitando el uso de tanques e intercambiadores de calor adicionales.

Las principales propiedades a tener en cuenta de las sales fundidas son:

- Bajo grado de contaminación ambiental
- No son inflamables
- Son compuestos abundantes
- Poseen baja presión de vapor, muy inferior a los aceites sintéticos
- Sólidos a temperatura ambiente, en caso de fuga se solidifican
- Sin degradación en el tiempo, se cree que su vida coincide con la de la planta¹⁵⁴, aunque la presencia de impurezas en las sales de carácter industrial, provocan la disminución en el ciclo de vida de las mismas.

La sal solar binaria es el compuesto para almacenamiento térmico más corriente en los sistemas CSP y su uso como fluido caloportador se utiliza, en la actualidad, en centrales con sistema de receptor de central de torre en USA¹⁵⁵ y en España¹⁵⁶. La mezcla salina consiste en un 60% de NaNO₃ y 40% de KNO₃ con una temperatura de fusión de 223°C y estable térmicamente hasta los 600°C.

¹⁵⁴ Turchi C., “Domestic Material Content in Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants” Concentrated Solar Power Program, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Washington DC. 2015.

¹⁵⁵ Peng Q., Yang X., Ding J., Wei X., Yang J. “Design of new molten salt thermal energy storage material for solar thermal power plant”. Applications Energy. N°112, pág.682-689, 2015.

¹⁵⁶ Kuravi S., Trahan J., Goswami D., Rahman M., Stefanakos E. “Thermal Energy Storage Technologies and Systems for Concentrating Solar Power Plants”. Program Energy Combust Science, N°39, pág.285-319, 2013.

Los efectos degradantes de estos compuestos sobre las aleaciones en contacto con ellos, han sido descritos por diferentes autores e cuanto a sus efectos en conducciones y tanques de almacenamiento¹⁵⁷. Uno de los primeros estudios sobre la corrosión en aleaciones base Ni y aceros pobres en él fue llevado a cabo en 1985 por Slusser¹⁵⁸ mediante ensayos en probetas sumergidas en la sal solar binaria a temperaturas cercanas a los 700°C obteniendo los mejores resultados en cuanto a resistencia a la corrosión para aquellas aleaciones base Ni con un contenido en Cr cercano al 20% mientras que los aceros con un contenido bajo o nulo en Ni no presentaban dicha resistencia a elevadas temperaturas.

Estudios sobre las velocidades de corrosión de otros aceros inoxidables austeníticos como el AISI 304 SS y AISI 316 SS y un acero al carbono A36 en contacto con la sal solar binaria a una temperatura de 570°C para los aceros inoxidables y 316°C para el acero al carbono mediante probetas sumergidas en dicha sal durante un tiempo cercano a 7000 horas y la determinación de las impurezas presentes en la sal comercial como algunos tipos de cloruros¹⁵⁹, observaron la pequeña influencia de ellos sobre los aceros inoxidables y mayor en el acero al carbono.

Otros estudios¹⁶⁰ sobre otro tipo de aceros como fueron el austenítico AISI 304 y el ferrítico AISI 430 con alto contenido en Cr y el acero T22 con bajo contenido en Cr, a temperaturas de 390 y 550°C y en un tiempo de 2000 horas, observaron mayor ganancia de masa en el acero T22 mientras que en los otros dos no la hubo debido al alto contenido en Cr de los aceros inoxidables que formaban una capa protectora de Cr₂O₃.

Los laboratorios norteamericanos SANDIA, en 2013 estudió el fenómeno de corrosión a elevada temperatura en otros aceros inoxidables y aleaciones base Ni del tipo INCONEL y HASTELLOY a diferentes temperaturas, desde 400°C hasta 680°C, en tres tramos y mediante la técnica de inmersión en baño de sales fundidas a esas temperaturas de tal manera que los resultados fueron que, en los aceros, a las temperaturas inferiores,

¹⁵⁷ Spiegel M., Mentz J. "High Temperature Corrosion beneath Nitrate Melts". Materials and Corrosion, N°65, pág.276-281, 2014.

¹⁵⁸ Slusser J., Titcomb J., Heffelfinger M., Dunbobbin B. "Corrosion in Molten Nitrate-Nitrite Salts". The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS), N°37, pág.24-27, 1985.

¹⁵⁹ Goods S., Bradshaw R. "Corrosion of Stainless Steels and Carbon Steel by Molten Mixtures of Commercial Nitrate Salts". Journal Mater Engineering Perform, N°13, pág.78-87, 2004.

¹⁶⁰ Fernandez A., Rey A., Lasanta I., Mato S., Brady M., Pérez Trujillo F.J. "Corrosion of Alumina-Forming Austenitic Steel in Molten Nitrate Salts by Gravimetric Analysis and Impedance Spectroscopy". Material Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion. N°65, pág.267-275, 2014.

no se apreciaba apenas tasa de corrosión pero al incrementar la temperaturas hasta los 680°C, dicha tasa se incrementó de forma considerable. Esto no ocurrió para las aleaciones base Ni en las que no se apreció un incremento en la tasa de corrosión tan grande como en el caso de los aceros.

Para el caso de la Sal Solar ternaria “Hitec”, la mezcla de nitratos y nitritos es la otra sal considerada en esta tesis, y es así por su principal ventaja respecto a la sal binaria que es su punto de fusión bastante inferior al de la sal binaria y mayor estabilidad térmica.

Estudios realizados¹⁶¹ sobre la Sal Solar Ternaria “Hitec” demuestran una menor pérdida de peso de este tipo de sal en comparación con el aparecido en la binaria, pero con un ligero aumento de él, a partir de los 550°C incrementándose a temperaturas superiores a esta y por lo tanto la estabilidad de la sal permanece por debajo de esta temperatura, aunque se puede mantener a 535°C mediante la adición de determinados componentes. La sal ternaria posee una viscosidad similar a la del agua a elevadas temperaturas. Estudios realizados sobre su comportamiento en contacto con aceros inoxidables como el AISI 321 no presentaron grandes tasas de corrosión a temperaturas cercanas a los 550°C manteniéndose e incluso parecía disminuir, al igual que ocurría en las aleaciones base Ni y es por ello que se trata de unos materiales apropiados para las conducciones de las sales calientes (565°C) y los depósitos de almacenamiento térmico de ellas. Estos ensayos con aceros al carbono mostraron un crecimiento superficial considerable lo que indica que no son recomendables para este tipo de sistemas.

Casi todas las mejoras aportadas en el desarrollo de sales han ido encaminadas a la localización de sales compatibles con puntos de fusión bajos para evitar su solidificación dentro de la planta, conductos y equipos y ello ha llevado a la incorporación de compuestos adicionales como LiNO_3 , se trata de un compuesto caro, y el uso de sales ternarias o cuaternarias. Bajo este aspecto, el cambio de tipo de sal se considera un riesgo operativo por encima de otras barreras tecnológicas y la posibilidad de conseguir una mejora en las propiedades térmicas de la sal permitirá una apreciable mejora en la eficiencia de las plantas.

¹⁶¹ Ding J., Yang J., Yang X. “*High-Temperature Thermal Stability of Molten Salt Materials*”. International Journal Energy Research, N°32, pág.1164-1174, 2008.

La capacidad de almacenamiento térmico a elevada temperatura está, básicamente, limitado a la disponibilidad de fluidos adecuados. Como se ha mencionado anteriormente, por encima de 400°C, la mayoría de los fluidos orgánicos de transferencia térmica tienden a su degradación con posterior descomposición. Para la generación de energía eléctrica mediante alta temperatura es, por tanto, necesario el uso de fluidos tales como sales fundidas, metales o aire. Pocos sistemas de almacenamiento se han probado con eficacia a tales fines existiendo muy poca información acerca del rendimiento de ellos y debido a sus propiedades físicas se hace necesario el aporte calorífico suplementario para evitar su solidificación a baja temperatura. Este aspecto puede significar la complejidad del sistema e incremento en los costes del mismo. El almacenamiento térmico mediante calor sensible de sales fundidas se ha investigado en profundidad en los Laboratorios Nacionales Sandia¹⁶². Los sistemas de alta temperatura de aire emplean algún tipo de material sólido inerte como roca para el almacenamiento térmico.

El costo de la mayoría de los sistemas de almacenamiento térmico se encuentra fuertemente ligado al fluido de almacenamiento utilizado. Los compuestos orgánicos presentan un coste elevado y los de medios mixtos como pueden ser las sales fundidas permiten una forma de reducción de ellos. El empleo de agua o vapor como fluido de almacenamiento utilizando un generador de vapor permitiría la eliminación de gran parte de estos gastos que, si se tratara de un sistema aceite térmico/agua, aunque por otro lado se vería incrementado por el alto coste de la presencia de un tanque de almacenamiento a presión.

2.3.- Análisis de ciclo de vida (ACV) en tecnologías solares

La evolución tecnológica en la generación de energía conlleva una serie de factores implicados en la conservación del medio ambiente y que van a determinar si una tecnología es sostenible o no con él. Estos factores, son principalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de agua y el uso del suelo.

En un Análisis de Ciclo de Vida de una central termosolar se han de tener en cuenta los procesos de fabricación o construcción, el mantenimiento, el desmantelamiento y la eliminación de los residuos generados.

¹⁶² William B. Stine and Geyer M., Power from the sun.: www.powerfromthesun.net, 2001.

Mediante revisión bibliográfica¹⁶³ se observan estudios de ACV comparativos de la influencia de los gases de efecto invernadero, el consumo de agua y el uso de la tierra asociados a la producción de 1 MW_e producido en una central termosolar con refrigeración seca/húmeda y con varios sistemas de respaldo entre los que se cita el almacenamiento térmico mediante sales fundidas y calentamiento del fluido de transferencia térmica mediante el aporte de gas natural. Con todo esto se observó que las centrales termosolares que contaban con el aporte exterior de gas natural presentaban, casi, 10 veces más emisiones de gases de efecto invernadero que las que operaban mediante almacenamiento térmico. Por otro lado, las plantas con generación que operaban mediante enfriamiento húmedo aumentaban el consumo de agua hasta en un 75% sobre las que lo hacían mediante refrigeración seca y en cuanto al factor del uso del suelo, se observó el menor valor numérico de las plantas con aporte de gas natural que las que operaban mediante almacenamiento térmico.

Respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero en la tecnología CSP cilindro-parabólico y teniendo en cuenta la presencia o no de almacenamiento térmico, se observó que las tecnologías de este tipo que no tenían capacidad de almacenamiento térmico presentaban un valor de emisiones de GEI próximos a 80 Kg de CO_{2equiv}/MW_h, la misma tecnología, pero con almacenamiento térmico alrededor de 30 kg. de CO_{2equiv}/MW_h y las híbridas (con aporte de gas natural) con almacenamiento térmico 170Kg. de CO_{2equiv}/MW_h y las híbridas sin almacenamiento térmico 240 kg. de CO_{2equiv}/MW_h. Contemplando esto, podemos deducir que la emisión de GEI es función directa del sistema de respaldo, gas natural o almacenamiento mediante sales fundidas, utilizado para dar continuidad a la generación de energía. En el estudio del consumo de agua, se observó que mediante la refrigeración seca se redujo el consumo de agua en este tipo de plantas con almacenamiento térmico mediante sales fundidas respecto a la misma, pero con refrigeración húmeda en un valor intermedio de 5 l./KW_h a 1 l./KW_h.

En cuanto al uso de la tierra en CSP y tomando como referencia la tecnología cilindro-parabólico, aquellas que no disponían de sistema de almacenamiento térmico generaban un valor de 366 m²/GW_eh mientras que las que sí disponían de él presentaban

¹⁶³ Klein Sharon J.W, Rubin Edward S. “*Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions, Water and Land Use for Concentrated Solar Power Plants with different Energy Backup Systems*”, Energy Policy, 2013.

unos valores de $322 \text{ m}^2/\text{GW}_e^{164}$, el uso de la tierra por MW_h generado, aumenta con sistema de almacenamiento térmico y disminuye con los sistemas de respaldo mediante gas natural. En cuanto al sistema de refrigeración, se aprecia que de la refrigeración seca a la húmeda hay, apenas, una diferencia del 1% en cuanto a la disponibilidad de la tierra.

En la Figura 39 de la página siguiente se reflejan los límites del sistema en un análisis de ciclo de vida medioambiental generalizado de las centrales termosolares¹⁶⁵.

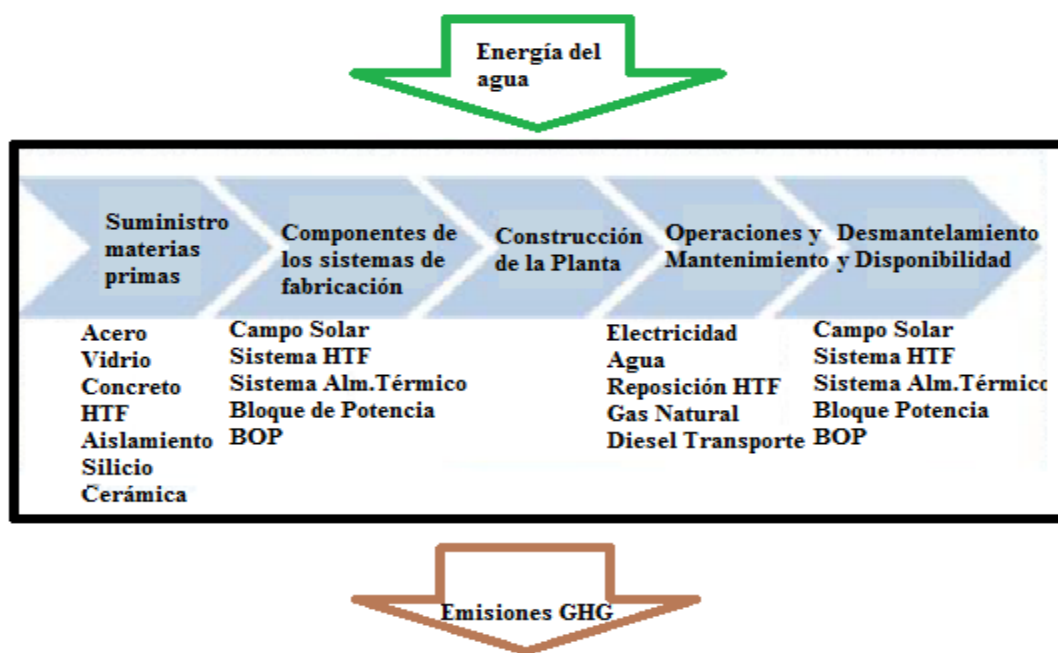


Figura 2.1: Límites del ciclo de vida medioambiental en termosolares.

Fuente: Klein et al., 2013

La fase inicial del Análisis de Ciclo de Vida consistió en un inventario mediante la recopilación de datos en lo referente a materiales y compuestos varios necesarios para el cálculo de los diferentes impactos ambientales implicados en el proceso, así como sus evaluaciones. El inventario del ciclo de vida fue dividido en dos etapas, una inicial en la que se contemplaba la construcción de la CSP que incluía la recepción de materias primas junto con la fabricación de los diferentes componentes que constituyen la planta y la segunda que tenía en cuenta las operaciones y mantenimiento de la planta termosolar. Para la fase de desmontaje y eliminación, se tuvieron en cuenta los valores aportados en

¹⁶⁴ Turchi C., Mehos M. "Current and Future Costs for Parabolic Trough and Power Tower Systems in the US Market" SolarPACES, France, Sandia National Laboratories, 2010.

¹⁶⁵ Klein Sharon J.W, Edward S. Rubin. "Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions, Water and Land use for Concentrated Solar Power Plants with different Energy Backup Systems", Energy Policy, 2013.

la bibliografía por Klein et al., 2013.

Mediante la consulta de diferentes estudios efectuados sobre este aspecto, se aprecia cierta disparidad de resultados en los distintos ACV debido a los supuestos considerados por las diferentes fuentes consultadas, así como los límites del sistema supuestos. Si nos ceñimos al ACV estudiado por Klein, los valores aportados por la emisión de gases de efecto invernadero fue de casi tres veces superior a estudios realizados con anterioridad.

Analizando los resultados de estos estudios, podemos deducir que las CSP con sistema de almacenamiento térmico presentan valores de emisiones de gases de efecto invernadero, inferiores a los obtenidos mediante ACV para las centrales híbridadas mediante respaldo de gas natural y atendiendo al tipo de refrigeración, las CSP con refrigeración seca tuvieron emisiones algo más elevadas y el consumo de agua y uso del suelo tuvieron aportes menores, en cuanto a estos parámetros, que las centrales que operan mediante refrigeración húmeda. Por este motivo, Klein consideran la necesidad del uso de sistemas de almacenamiento térmico y refrigeración seca para futuras centrales termosolares.

La consulta de otras referencias bibliográficas sobre la técnica de Análisis de Ciclo de Vida en centrales termosolares nos induce a contemplar tres categorías que se refieren a todo el sector de la generación de energía mediante CSP, otra al análisis de una tecnología específica y por último a elementos o sistemas implicados en una planta termosolar.

Respecto al análisis del sector en general y considerando en particular los datos de España, aparece como resultado, en tiempo, del retorno energético, un año y la emisión de 0.2 kgr.CO_{2equiv}/KW_e generado durante la vida útil de la central¹⁶⁶.

Respecto a las tecnologías en concreto y comparando las de receptor central de torre y las cilindro-parabólico, se observó que las emisiones fueron menores que en el

¹⁶⁶ Lechón Y., De la Rúa, C., and Sáez, R. “Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solar Thermal Power Plants in Spain”. Journal of Solar Energy Engineering, N°130(2), 2008.

caso anterior $0.026 \text{ kgr.CO}_{2\text{equiv.}}/\text{KW}_e$ y un consumo de recursos hídricos de $51/\text{KW}_e$ ¹⁶⁷.

En el caso del ACV de los elementos o sistemas específicos implicados en una planta arrojó valores de $5.3 \text{ kgr.CO}_{2\text{equiv.}}/\text{KW}_e$ y 274 m^3 de consumo hídrico por heliostato de superficie de 148 m^2 .¹⁶⁸

Como se ha comentado anteriormente, el sistema de refrigeración de las plantas termosolares en los ciclos de vapor o la limpieza de los heliostatos tienen una importancia considerable a la hora del consumo hídrico a la hora de la generación de energía. La generación de energías renovables mediante la tecnología fotovoltaica y eólica presentan los valores más reducidos en cuanto a consumo de agua.

Los tipos de refrigeración que pueden presentar las centrales termosolares son húmeda con recirculación, seca y un sistema combinado de ambas. La tecnología Cilindro-Parabólica requiere un 40% más de agua que la tecnología de receptor central de torre.

A la hora de planificar una CSP, uno de los mayores problemas es el recurso hídrico debido a que suelen ubicarse en zonas áridas que son las que presentan más tiempo e intensidad de radiación solar pudiendo tratarse, el recurso hídrico, de un factor limitante en la implantación de la central.

Según la DOE, en el año 2009, una CSP con tecnología cilindro-parabólico ubicada en el desierto de Mojave, California presenta un consumo de agua de $3.000 \text{ m}^3/\text{GW}_e$ mientras que una con tecnología de receptor central de torre con refrigeración húmeda llega a los $2.100 \text{ m}^3/\text{GW}_e$. Mediante refrigeración en seco con un condensador de aire se consigue eliminar hasta en un 90% las necesidades de agua pudiendo quedar un consumo estimado de alrededor de $340 \text{ m}^3/\text{GW}_e$. Este sistema de refrigeración en seco, a primera vista, parece ser el más adecuado pero la desventaja surge cuando hay días muy calurosos y es entonces cuando el rendimiento de este tipo de refrigeración disminuye de manera drástica y por tanto afecta a la eficiencia de la planta. La diferencia entre

¹⁶⁷ Burkhardt J.J., Heath G.A. and Turchi C.S. “Life Cycle Assessment of Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and Impacts of Key Design Alternatives”. Environmental Science and Technology, N°45(6), pág.2457-2464. American Chemical Society. DOI:10.1021/es1033266, 2011.

¹⁶⁸ Heath G.A., Iii J.J.B., and Turchi C.S. “Life Cycle Environmental Impacts Resulting from the Manufacture of the Heliostat Field for a Reference Power Tower Design in the United States”. Proceedings of the SolarPACES 2012. Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Morocco, 2011.

refrigeración seca y húmeda, dependiendo de la ubicación de la planta puede llegar a representar hasta un 10% de reducción en la producción energética¹⁶⁹.

¹⁶⁹ Damerau K., Keith Williges A.G., Gauché P.P., “*Costs of Reducing Water use of Concentrating Solar Power to Sustainable Levels: Scenarios for North Africa*”, Energy Policy, 2011.



MATERIALES Y COMPUESTOS EN
CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE
TORRE CON ALMACENAMIENTO
TÉRMICO

3. MATERIALES Y COMPUESTOS EN CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Como se ha explicado anteriormente, la finalidad de las plantas termo solares es la generación de energía eléctrica mediante una turbina que es movida por el vapor generado por un intercambiador mediante intercambio térmico de un fluido calo portador como son las sales fundidas. Explicado esto, se puede deducir que la forma más eficiente de conseguirlo es a través del incremento de temperatura y presión del vapor de agua.

Teniendo en consideración este aspecto, se puede deducir que todos los materiales implicados en ello han de estar desarrollados para que puedan soportar las condiciones más adversas provocadas por la influencia de los diferentes agentes en contacto con ellos y es por este motivo por el que es de vital importancia el uso de aceros que soporten tales condiciones como pueden ser la fatiga ocasionada por los ciclos de trabajo así como la fluencia a elevada temperatura y el efecto de la corrosión en estas condiciones.

3.1.- Aleaciones para aplicaciones de alta temperatura en CSP

Los aceros utilizados en los procesos en los que los ciclos de trabajo con sales fundidas a elevadas temperaturas han de poseer una serie de propiedades específicas, mecánicas y de resistencia a los diferentes procesos de corrosión que les permitan operar a temperaturas superiores a los 500°C y que en la mayoría de los casos significan el incremento en la eficiencia y rendimiento en la generación de energía lo cual se traduce en un aumento de la rentabilidad.

Un acero que se encuentra sometido a altas temperaturas, puede estar en contacto con diferentes medios. Si el medio es aire, el principal agente oxidante es el O₂, pero lo más usual es que los aceros sometidos a estas temperaturas se encuentren en ambientes agresivos como pueden ser gases o fluidos que, durante los ciclos de trabajo, lo deterioran por diferentes reacciones químicas como pueden ser nitruraciones, carburizaciones o por depósitos de sales y cenizas que en presencia de oxígeno pueden darse conjuntamente reacciones oxidativas.

Las condiciones de trabajo de los diferentes componentes de una planta termosolar son susceptibles de sufrir estos procesos por el hecho de trabajar en medios muy agresivos

como es el contacto con sales fundidas a elevadas temperaturas y el vapor de agua generado para la producción de energía eléctrica.

Por lo explicado anteriormente, los aceros, comúnmente, utilizados para aplicaciones de elevadas temperaturas en medios agresivos, son del tipo inoxidable austenítico, aceros con aleantes como Ni, Co, Ta etc. que aportan a los materiales las propiedades requeridas para acometer su función durante prolongados períodos de trabajo y que permitan prolongar el tiempo en servicio de ellos.

La selección de los aceros implicados en estos procesos, además de su capacidad de resistencia a estas temperaturas en presencia de sales fundidas, tan importante o más es el tiempo que pueden permanecer sometidos a esas condiciones lo cual influirá en su eficiencia al permitir un mayor número de ciclos de trabajo en la planta.

Por otro lado, los procesos a elevada temperatura durante determinado tiempo, pueden influir de forma negativa sobre el comportamiento de los aceros debido a la aparición de determinados procesos de corrosión y la merma de sus propiedades mecánicas que pueden conducir a la ruptura.

En la actualidad, la tendencia en las plantas de generación de energía mediante almacenamiento térmico directo, pasa por la mejora en la eficiencia termodinámica mediante el incremento de temperaturas y presiones de trabajo con el fin de obtener el rendimiento más elevado y minimizar las emisiones de CO₂ a la atmósfera, como sucede en los sistemas de generación de vapor que por el incremento de las temperaturas y presiones de trabajo se puede superar, en más de un 15%, el rendimiento del equipo sin perjuicio del tiempo en servicio de ellos¹⁷⁰.

En el Gráfico 2, se muestra la tendencia futura de trabajo mediante condiciones ultra supercríticas de vapor consiguiendo una eficiencia superior al 50% y la reducción de emisiones de CO₂.

¹⁷⁰ Bakker W.T. “*Materials for Advanced Boilers Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation*”, pág.435-444, 1999.

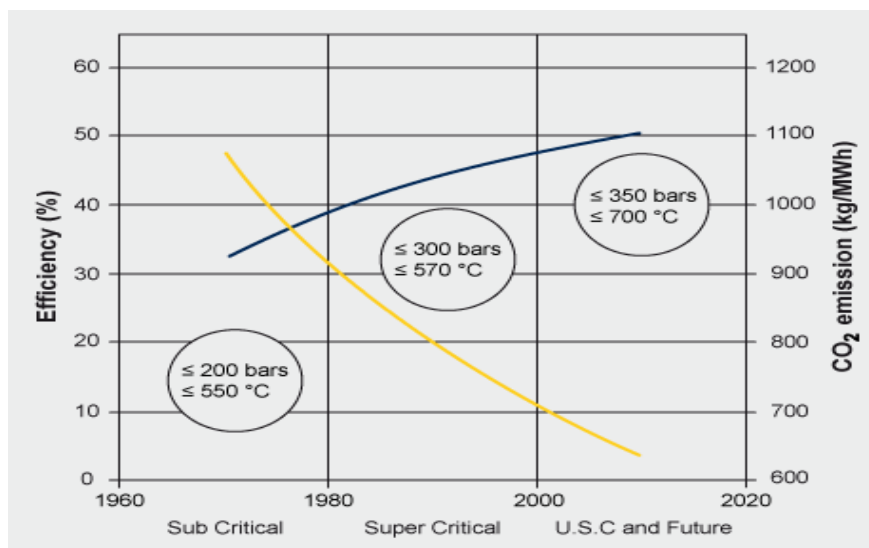


Gráfico 3.1: Efecto de las condiciones de trabajo por generación de vapor en cuanto a eficiencia y emisiones
Fuente: IMO (International Molybdenum Association)

De entre los aceros utilizados para operar a elevadas temperaturas se encuentra, principalmente, los siguientes:

Fundiciones: Son una familia de las aleaciones férreas con contenido en C por encima del 2% y con determinada concentración de Si, que ocasiona la grafitización del C. Son materiales con elevada fluidez en estado líquido y baja absorción de gases. Cuando solidifica, no tiene gran contracción lo que le infiere una elevada resistencia, pero también fragilidad y por tanto baja resistencia al impacto. Se emplean como materiales resistentes a elevada temperatura en hornos, depósitos y otros materiales específicos. Tienen un bajo coste, buen conformado y buena resistencia mecánica y a la erosión¹⁷¹.

Aceros: Los aceros utilizados para el trabajo a elevadas temperaturas son desarrollados para evitar, fundamentalmente, problemas de corrosión. En los aceros austeníticos que se plantean en esta tesis, el requerimiento principal es el mencionado anteriormente¹⁷². La adición de determinados elementos, les confieren diversas propiedades. El Ni aporta alta resistencia y protección frente al fenómeno de corrosión a elevada temperatura y aportando diferentes concentraciones se consigue mejorar sus

¹⁷¹ Xing J. D., Gao Y. M., Wang E. Z. and Bao C. G. "Effect of Phase Stability on the Wear Resistance of White Cast Iron at 800°C", Elsevier, Wear N°252, pág.755-760, 2002.

¹⁷² Frangini S. and Masci A. "Surface and Coatings Technology", N°184, pág.31-39, 2004.

Tschietschin A. P., Garzón C. M. y López D. M. "180 Years of Scratch Testing", Tribology International, N°39, pág.167-174, 2006.

Kamachi Mudali U., Bhuvaneswaran N., Shankar P. y Raj B. "Corrosion Science", N°46, pág.2867-2892, 2004.

propiedades para su aplicación al trabajo a elevadas temperaturas¹⁷³.

La adición de Co se suele encontrar en aceros destinados a componentes estructurales como pueden ser las turbinas presentando, sus componentes, buena resistencia frente al fenómeno de corrosión en caliente a lo largo de su vida útil¹⁷⁴ y la adición de Mo evita, en gran medida, el fenómeno de corrosión por picadura.

Los aceros inoxidable austeníticos, como aceros principales en este trabajo, presentan elevado contenido en Cr y Ni, aleantes que confieren buena resistencia al fenómeno de corrosión a elevada temperatura. Uno de los más utilizados para esta tecnología es el AISI 304 con 18% de contenido en Cr y 8% en Ni, aleantes que, mediante precipitación, forman carburos en los bordes de grano cuando la temperatura de exposición supera los 500°C, aunque la migración del cromo para formar estos carburos provoca vacantes en la estructura matriz que provoca corrosión intergranular si se expone a ambientes agresivos. La adición de determinadas cantidades de Ti y Nb conducen a otro acero llamado AISI 321 con el que se consigue, mediante la formación de carburos, minimizar el problema de corrosión localizada, efecto también conseguido mediante la reducción del contenido en C, generando los aceros AISI 304L.

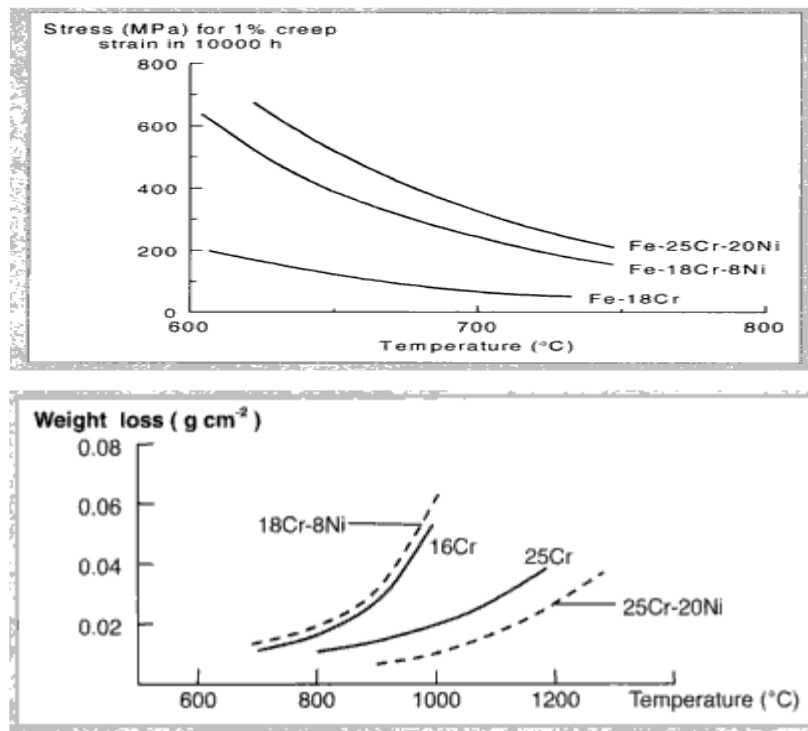


Gráfico 3.2: Resistencia a la fatiga y pérdida de peso frente a la temperatura en varios aceros austeníticos. Fuente: Meethan y Voorde (2000).

¹⁷³ Yang J. X., Zheng Q., Sun X. F., Guan H. R. y Hu Z. Q. *Scripta Materialia*, N°55, pág.331-334, 2006. Geng, L., Na, Y. S. y Park, N. K. *Materials and Design*, N°28, pág.978-981, 2007.

¹⁷⁴ Lee J. W. y Kuo Y. C. *Surface and Coatings Technology*, N° 200, pág.1225-1230, 2005.

Como se aprecia en el gráfico de la derecha, el incremento de contenido en Cr evita la pérdida de masa en el acero y el contenido en Ni tiene efectos poco apreciables en cuanto a la resistencia a la oxidación, aunque si es beneficioso en cuanto a posibles problemas causados por corrosión bajo tensión y aumenta la resistencia del acero en presencia de ambientes básicos.

En el siguiente apartado se tratará de forma individual las características y propiedades de los aceros implicados en este trabajo.

3.1.1.-Acero inoxidable austenítico AISI 347H

El AISI 347H es un acero inoxidable austenítico de alto contenido en C y Cr con un porcentaje de Nb que evita la precipitación de carburos y por tanto la corrosión intergranular. Se trata de un acero con un comportamiento excelente para elementos que sufren ciclos de calentamiento y enfriamiento repetidos a temperaturas que oscilan entre los 430°C y 880°C.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	N (%)	Ta (%)
0,06	2,0	0,045	0,030	1,0	10,00	18,00	0,48	0,02	0,5

Este acero presenta una resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas y propiedades mecánicas superiores a los anteriores, precisamente, por su estabilización mediante Nb. La máxima temperatura de trabajo es de 900°C.

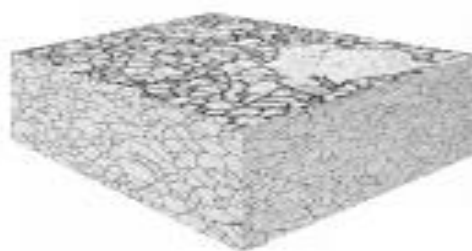


Figura 3.6: Detalle microestructura acero inoxidable austenítico 347 estabilizado
Fuente: Virkkunen, Iikka, “Thermal Fatigue of Austenitic and Duplex Stainless Steels”

El alto contenido en C le proporciona una notable mejora en cuanto a propiedades de fluencia a elevada temperatura.

3.1.2.-Superalación termo-resistente HRSA tipo INCONEL 617

La aleación rica en Ni, INCONEL 617 es una solución sólida Cr-Ni-Co-Mo que aporta una excepcional combinación de resistencia a elevada temperatura y a la oxidación, así como una elevada resistencia a una amplia gama de ambientes corrosivos. Perteneció al tipo superaleaciones termo-resistentes (conocidas como HRSA=*High Resistant Super Alloy*). Se forma con facilidad y presenta buena soldabilidad mediante técnicas convencionales.

Los altos contenidos en Cr y Ni hacen de ella una aleación resistente a una gran variedad de ambientes oxidantes y reductores. La combinación del Al con el Cr aporta resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas y el Co y Mo aportan el fortalecimiento de la solución sólida. La composición química de esta superaleación, viene determinada por la siguiente tabla:

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Mo(%)	Si(%)	Ni(%)	Cu(%)	Cr(%)	B(%)	Ti(%)	Al(%)
0,08	0,5	0,015	0,015	12,0	9,0	0,50	44,5	0,50	22,00	0,006	0,60	0,90

La combinación de elevada resistencia mecánica y a la oxidación a temperaturas superiores a 982°C hacen de esta aleación un material atractivo para los componentes de las CSP sometidos a condiciones extremas como son los conductos que transportan las sales fundidas desde el receptor hasta el tanque de sales calientes (565°C), los tubos de pequeño diámetro alojados en el receptor y que reciben la radiación solar concentrada por los heliostatos y el propio tanque de sales calientes (565°C) que ha de someterse a innumerables ciclos térmicos.

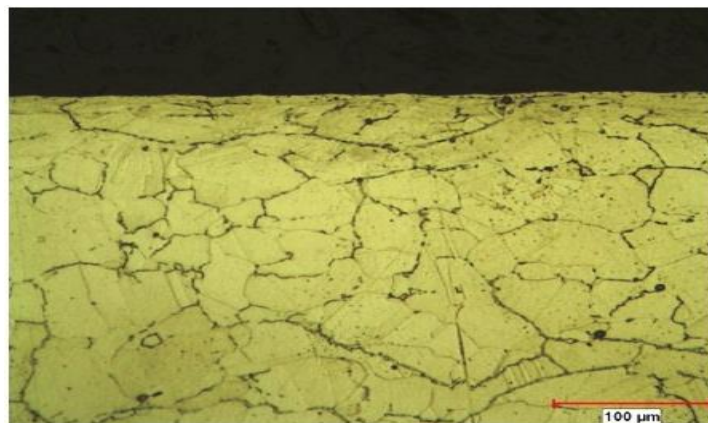


Figura 3.7: Detalle microestructura superaleación INCONEL 617

Fuente: González Ibarra G., Haro Hernández S., Integridad de la superficie de maquinada en INCONEL 617 con herramientas CBN/PVD, Ingenier. mecáni. tecnolog. desarroll vol.4 no.5 México sep. 2013.

Estudios realizados sobre la exposición de esta aleación a temperaturas entre 593°C-760°C mostraron que, a pesar de su endurecimiento por la formación de carburos y disminución de la ductilidad, no aparecieron fases de fragilización.

En cuanto a la resistencia a la corrosión de esta aleación, debido a las elevadas cantidades de Ni, Cr y Al, presenta muy buena resistencia a la oxidación y carburación a elevadas temperaturas. Estos aleantes, junto con el Mo, permiten que la aleación tenga un buen comportamiento en ambientes corrosivos húmedos.

A elevadas temperaturas, el Cr y el Al provocan la formación, casi inmediata, de una delgada capa superficial de óxido que facilita la difusión del Cr para formar una capa protectora de óxido de cromo sobre la superficie metálica ayudando también, a evitar la exfoliación de la capa protectora.

3.2.- Sales fundidas para almacenamiento térmico en CSP

Las sales fundidas se distinguen, principalmente, por el hecho de tratarse de unos compuestos que permiten la transferencia de calor y su capacidad de almacenarlo siendo fundamentales en la tecnología de plantas de receptor central con almacenamiento térmico. Las sales compuestas por nitratos alcalinos, en esta tesis de Na y K, son excelentes candidatos dado su bajo punto de fusión y capacidad calorífica lo que les permite el almacenamiento térmico antes mencionado, aunque la continuidad en los ciclos de calentamiento y enfriamiento provoca su degradación y el acortamiento de su vida útil, así como la generación de residuos contaminantes en perjuicio del medio ambiente.

El empleo de las sales fundidas en las termosolares con almacenamiento térmico se encamina a la mejora en la eficiencia de conversión energética con una reducción en el coste de generación eléctrica¹⁷⁵ aprovechando sus características que, principalmente, son bajo punto de fusión, baja viscosidad, baja presión de vapor y alta estabilidad térmica y capacidad calorífica.

La conocida como sal solar (binaria) como la “Hitec” (ternaria) aportan la mayoría de las características anteriores¹⁷⁶.

¹⁷⁵ Tao Wang, Divakar M., and Ramana G. Reddy, “*Novel Low Melting Point. Quaternary Eutectic System for Solar Thermal Energy Storage*”, Applied Energy, N°102, pág.1422/-429, 2013.

¹⁷⁶ Olivares R.I. “*The Thermal Stability of Molten Nitrite/Nitrates Salt for Solar Thermal Energy Storage in different Atmospheres*”, Solar Energy Journal, N°86, pág.2576-2583, 2012.

El uso de sales fundidas y más concretamente de las sales de nitratos fueron utilizados inicialmente en sistemas de intercambiadores de calor hace más de setenta años y consistía en una mezcla de nitratos de sodio y potasio¹⁷⁷. En esta mezcla inicial se detectó el problema de la variación en el punto de fusión de la mezcla, así como la formación de sólidos.

Estudios posteriores¹⁷⁸, llevarían a la incorporación de un nuevo componente, el nitrito sódico, mediante el cual se obtuvo una sal ternaria correspondiente a la mezcla: 53% KNO_3 /7% NaNO_3 /40% NaNO_2 con un punto de fusión de mezcla de 140°C y teniéndose en cuenta como un importante compuesto para el almacenamiento térmico siendo utilizado en plantas experimentales. El problema en esta mezcla residía en que a temperaturas superiores a 340°C aparece la oxidación de los nitritos al contacto con la atmósfera y era preciso el uso de algún tipo de gas inerte para evitarlo, lo que ha sido el principal obstáculo a la hora de su uso en las termosolares con almacenamiento térmico.

Estudios actuales van dirigidos a la incorporación de diferentes componentes y variación de los porcentajes de nitratos y nitritos, en la sal ternaria inicial, con la finalidad de disminución en el punto de fusión y así conseguir un coste menor por el hecho del aporte energético extraordinario para evitar la solidificación de las sales.

La idoneidad de este tipo de sales para el almacenamiento térmico en las centrales termosolares han provocado un profundo estudio de ellas para conocer sus capacidades y efectos sobre los materiales utilizados, aceros, por el hecho de estar en contacto, ambos, a elevadas temperaturas. Por todo esto y observando los efectos negativos de este contacto, se iniciaron para la sal solar binaria $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$, estudios¹⁷⁹ sobre la adición de determinados compuestos inhibidores de la corrosión, principalmente observada en los tanques de almacenamiento y que algunos son: Na_2O , CuO , NiO , Al_2O_3 , Mn_3O_4 .etc.

En la actualidad, los principales estudios se basan en la sal ternaria, mencionada anteriormente, y alguna experiencia con sales cuaternarias pero con el objetivo de la adición de diferentes compuestos que limiten el problema de corrosión comentado y por otro lado que no generen residuos que degraden la sal fundida acortando su ciclo de vida y por otro lado, la posibilidad de emisión al medio ambiente, de alguno de estos

¹⁷⁷ Bates J., “*Control of Heat Transfer Salts*”. Houdry Process Corporation, 1940.

¹⁷⁸ Kalichevsky V., “*Treatment of Heat Transfer Salts II*”, 1940.

¹⁷⁹ Walter, R.J., “*Salt Corrosion Inhibitors*”, 1985.

compuestos o residuos generados, que ocasionaran el incremento de daños en sus diferentes categorías y su influencia en el impacto ambiental.

Desde el punto de vista físico-químico, la investigación está centrada en el desarrollo de mezclas de sales y aditivos que consigan reducir los puntos de fusión de los compuestos actuales, mejorar la capacidad calorífica y la conductividad térmica de la sal.

3.2.1.- Sal Solar binaria (60%NaNO₃ + 40%KNO₃)

Debido a las elevadas cantidades necesarias para su uso y su bajo costo, se trata de una sal óptima para su empleo a escala comercial en las centrales termosolares con almacenamiento térmico. Las principales propiedades físicas que le permiten su viabilidad son las siguientes:

- Densidad: 1880 Kg/m³
- Calor Específico: 1500 J/Kg °K
- Presión de vapor: < 0.01Pa
- Temperatura de solidificación de la sal: 220°C
- Temperatura de degradación de la sal: 512°C (en función de las impurezas presentes)

El empleo de grandes cantidades de sales a escala comercial conlleva la existencia de determinadas impurezas que influyen, de diferentes maneras, en su capacidad de almacenamiento térmico, así como la generación de compuestos corrosivos que acortan la vida, tanto de las sales como de los materiales implicados en las plantas. Un ejemplo de estas impurezas, originadas mediante reacciones químicas de los nitratos, es la aparición de Mg(NO₃)₂ y cuyo efecto directo es el aumento en el punto de fusión de la sal lo que obliga a un aporte energético extraordinario para mantener el estado fundido de la sal¹⁸⁰.

De entre los aditivos considerados en esta mezcla de sales, los que más influyen en la evolución en la mejora de las propiedades perseguidas en cuanto reducción de la temperatura de fusión e incremento en la capacidad de almacenamiento térmico son el Ca(NO₃)₂ y el LiNO₃.

Ca(NO₃)₂: Se trata de un aditivo de bajo coste, gran capacidad de almacenamiento térmico

¹⁸⁰ Medrano M. et al., "State of the Art on High-Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation." Part.2, Case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.

y disminución del punto de fusión de la mezcla salina. Presenta tales propiedades, que se ha pensado en su utilización como sustituto de la sal solar, así como del aceite sintético como fluido de transferencia térmica HTF en el almacenamiento térmico indirecto.

$Li(NO)_3$: Es, junto con el anterior, un aditivo ampliamente estudiado en el que se aprecia una gran estabilidad térmica aportada a las sales¹⁸¹, aunque se trata de un aditivo más caro que los nitratos de la sal solar y el de calcio. Aun así, la adición de pequeñas cantidades de Li, ha supuesto, la mejora en el rendimiento de la sal fundida de tal manera se ha comprobado que a elevadas temperaturas se generan elevadas concentraciones de O^{2-} , independientemente de la temperatura, incrementándose su contenido según aumenta la concentración de nitrato de litio en la sal¹⁸². El aporte de una cantidad determinada de nitrato de litio provoca la disminución en el punto de fusión de la sal, así como su poder corrosivo sobre los materiales.

$Ca(NO_3)_2 + Li(NO)_3$: Se han llevado a cabo estudios de mezclas cuaternarias que incorporan, a la sal solar, ambos aditivos y es así que la empresa HALOTECHNICS incorpora cinco componentes entre los que se encuentra el $CsNO_3$ y consiguiendo la reducción del punto de fusión de la sal hasta $70^\circ C$, pero con un coste demasiado elevado como para su viabilidad a escala comercial¹⁸³.

El problema que acarrea la incorporación de diferentes componentes con el fin ya descrito es la posible aparición de iones, como el Cl^- , procedentes del KCl presente en la mayoría de las sales y que, aunque se encuentren en pequeña proporción, pueden ocasionar fenómenos de corrosión en los diferentes sistemas de la planta que se encuentren en contacto con ellos. Otro parámetro físico que se ve afectado por la incorporación de ellos es la viscosidad ya que ambos la incrementan cuando se alcanzan valores próximos al punto de fusión y ello dificulta la fluidez de la sal a través de los componentes de la planta.

Si se tiene en cuenta el aspecto económico, los componentes principales de estas

¹⁸¹ Bradshaw R.W., N.S., “*Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough. Energy Sustainability*”, 2008.

¹⁸² Bradshaw R.W. and Meeker D.E., “*High-Temperature Stability of Ternary Nitrate Molten Salts for Solar Thermal Energy Systems*”. Solar Energy Materials, pág.51-60, 1990.

¹⁸³ Justin W., Raade D.P., “*Development of Molten Salt Heat Transfer Fluid with Low Melting Point. and High Thermal Stability*”. SolarPACES 2010.

sales son baratos siguiendo el siguiente orden de precios¹⁸⁴: $\text{Ca} < \text{Na} < \text{K} < \text{Li}$, orden que se ha mantenido los últimos años, procedente de un estudio de sales fundidas ternarias para una tecnología de receptor central de torre¹⁸⁵. En los últimos años y dada la volatilidad de precios de mercado, el precio de estos compuestos ha aumentado ligeramente, aunque siempre será más barato su uso que el de aceites orgánicos como HTF.

De las diferentes sales mencionadas anteriormente, la más costosa es el $\text{Li}(\text{NO}_3)_3$ intentando abaratar su precio mediante la obtención de Li a partir del tratamiento de Li_2CO_3 con HNO_3 en el mismo emplazamiento de la central termosolar¹⁸⁶.

A la hora de conseguir mezcla de sales óptimas, de mayor eficiencia, se ha de tener en cuenta el coste de las mismas. Por ello, aunque, por ejemplo, el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ es el componente más barato, sus efectos de aumento de viscosidad de las mezclas y la inestabilidad térmica, lo hacen ser menos aceptado en las composiciones. Por otro lado, el $\text{Li}(\text{NO}_3)_3$ es el de mayor coste, pero presenta propiedades muy valoradas como la reducción de la temperatura de licuefacción, estabiliza de la viscosidad, aunque como efecto negativo se encuentra que la temperatura máxima de uso es menor¹⁸⁷.

3.2.2.- Sal Solar Ternaria “Hitec” (40% NaNO_2 + 7% NaNO_3 + 53% KNO_3)

La sal ternaria Hitec¹⁸⁸ fue desarrollada por G.Picard observando en ella las siguientes propiedades:

- Densidad: 1640 Kg/m^3
- Calor Específico: $1560 \text{ J/Kg } ^\circ\text{K}$
- Presión de vapor: $< 0.01 \text{ Pa}$
- Temperatura de solidificación de la sal: 140°C
- Temperatura de degradación de la sal: 626°C (en función de las impurezas presentes)

¹⁸⁴ Hoshi A., Mills D. R., Bittar A., Saitoh T. S., Solar Energy, N°79, 3332, 2005.

¹⁸⁵ Bradshaw R.W. and Tyner C.E., "Chemical and Engineering Factors Affecting Solar Central Receiver Applications of Ternary Molten Salts", Sandia National Laboratories, July 1988.

¹⁸⁶ Bradshaw R. W. and Tyner C. E., "Chemical and Engineering Factors Affecting Solar Central Receiver Applications of Ternary Molten Salts", Sandia National Laboratories, 1988.

¹⁸⁷ Robert W. Bradshaw and Nathan P. Siegel. "Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough". Proceedings of ES2008 Energy Sustainability, Jacksonville, USA SOLAR POWER SYSTEMS, August 10-14, 2008.

¹⁸⁸ Picard G., "Process for Stabilizing a Mixture of Molten Alkali Metal Nitrates and Alkali Metal Nitrites Usable Particularly as a Heat Transfer Fluid and Stabilized Mixture Thus Obtain", United States Patent 4559993, 1985.

Fue ensayada en la planta experimental Themis en el año 1984, en Francia con unos excelentes resultados aunque era necesario el uso de gas inerte a partir de 300°C para evitar que el oxígeno del aire oxidara los nitritos y por tanto modificara la composición de la mezcla y por tanto sus propiedades físico-químicas y el hecho de acondicionar una planta para que trabaje en atmósfera inerte supone un coste demasiado elevado, no obstante, considerando los beneficios técnicos y medioambientales que pudieran aportar este tipo de sales, será una de las que se tome en cuenta a la hora de desarrollar el estudio.

El principal problema de esta mezcla de sales se presenta en su comportamiento frente a la corrosión de los aceros presentes en los distintos sistemas de la central, en contacto con las sales y el aporte de energía extra necesaria, mediante calentadores, para mantener la temperatura de las sales por encima de su punto de congelación provocando un gasto energético elevado. Por este motivo se persigue la creación de nuevos compuestos aptos para el almacenamiento térmico que consigan aumentar el rango de temperaturas de operación, de bajo coste y buena estabilidad térmica.

Se han desarrollado variantes de la formulación “Hitec” tales como la “Hitec XL” cuya composición corresponde a 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7% NaNO_3 + 45% KNO_3 cuyo punto de fusión desciende hasta 130°C y la descomposición se da a 500°C.

En la actualidad existe una formulación alternativa desarrollada por el profesor F.J. Pérez Trujillo de la UCM de Madrid compuesta por este tipo de compuestos con la adición de nano partículas inorgánicas/orgánicas consiguiendo una temperatura de fusión cercana a los 130°C y temperaturas de descomposición superiores a los 580°C. La composición de esta novedosa formulación consiste en una mezcla de sales inorgánicas de nitratos y cloruros, nitratos/nitritos/cloruros, nitratos/sulfatos/cloruros, nitratos/carbonatos/cloruros y diferentes combinaciones de los anteriores. La incorporación de las nano partículas de grafeno mejoran la conductividad térmica y disminuyen el punto de fusión lo que, finalmente, incidirá en el rendimiento final de la central termo Solar.

3.3.- Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las aleaciones consideradas

El empleo de aceros en las centrales termo solares y el contacto de ellos con agentes agresivos en condiciones de elevadas temperaturas da lugar a una degradación que se traduce en la aparición de una serie de productos, sólidos o vapores, principalmente formados por los diferentes aleantes, que componen los aceros, en forma de óxidos, nitruros, sulfuros etc. Por otro lado, también hay que tener en consideración, además de los elementos agregados a un acero como mejora de sus propiedades, las emisiones provocadas por la fabricación del acero base y las provocadas por la energía utilizada en su fabricación.

Si nos remontamos al año 2009, la Universidad de Yale, realizó un Análisis de Ciclo de Vida de un acero inoxidable determinado identificando las cuatro etapas principales en lo referente a la vida útil del material. Las etapas que se tuvieron en cuenta fueron las siguientes:

- *Etapas de Fabricación*: Proceso que incluye la producción completa del acero inoxidable para productos largos y planos acabados, a partir de las materias primas y uso en la manufactura.
- *Etapas de Fabricación y Manufactura*: Mediante esta etapa, se utiliza el acero inoxidable terminado, en diferentes sectores para la generación de productos finales.
- *Etapas de Uso*: En esta, los productos finales son utilizados por el usuario y permanece durante su vida útil.
- *Etapas de Reciclado*: Etapa en la que al final de la vida útil del acero, se recicla o deshecha en vertedero.

Mediante la Figura 30, se aprecia la relación de las cantidades de materias primas con los productos de vida final como son el acero inoxidable reciclado y el deshecho.

De la misma figura se puede deducir que el flujo de generación del acero inoxidable está relacionado con la generación de chatarra y su uso. En el estudio realizado por Yale, el 60% de los materiales utilizados para la producción de acero inoxidable, son

chatarras procedentes del deshecho de otros aceros inoxidables y aceros al carbono, dejando el uso de materias primas para la producción del acero, en un 45%.



Figura 3.8: Ciclo de vida del Acero.

Fuente: ISSF Stainless Steel Forum, Yale University, 2009.

El acero inoxidable permite un reciclaje del 100% y diferentes estudios estiman que, al menos, el 70% de los aceros inoxidables, se reciclan al final de su vida útil. Dependiendo del tipo de acero, su disponibilidad en forma de chatarra y su ubicación, la fabricación de acero mediante horno de arco eléctrico puede llegar a ser muy ventajosa.

Como se ha comentado anteriormente, el impacto medioambiental provocado por la fabricación y el uso de los diferentes materiales, se suele medir por la cantidad en las emisiones y las necesidades energéticas, siendo influyentes las tomas de decisiones y consideraciones de los consumidores de tal manera que un producto respetuoso con el medio ambiente es altamente valorado en el momento de su elección.

La fabricación de acero inoxidable a partir de materias primas recicladas, se ve favorecida a la hora del uso energético en el proceso, que será menor, y por la disposición de residuos en su producción, que evitará, en gran medida, emisiones a la atmósfera.

El hecho de tratarse de un material reciclable al 100% y tener una vida útil de producto muy elevada y ello nos conduce a la reducción en el consumo de recursos naturales y energéticos durante la vida útil de los productos fabricados con acero inoxidable en comparación con otros productos generados a partir de materiales con

desgaste más rápido y por tanto necesitando ser sustituidos con mayor frecuencia.

Los aceros que se han seleccionado para el estudio son los, utilizados, en la mayoría de los componentes, pertenecientes a una central termosolar de receptor central y de los cuales uno de ellos es el acero inoxidable AISI 347H que es el que se va a considerar en los componentes que sufren condiciones menos severas en cuanto a atmósfera y contacto con sustancias agresivas, y por otro lado, la superaleación base Ni del tipo INCONEL 617, para los componentes de la central que tengan que estar presentes en ambientes agresivos y elevadas temperaturas como es el receptor, los conductos que transportan la sal fundida hacia el tanque de sales calientes (565°C), el tanque de sales calientes (565°C) y el ciclo de potencia.

Material	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Mo(%)	Si(%)	Ni(%)	Cu(%)	Cr(%)	N(%)	Nb(%)	Ti(%)	B(%)	Ta(%)	Al(%)
AISI 347H	0,06	2,0	0,045	0,03			1,0	10,0		18,0	0,02	0,48			0,5	
INCONEL 617	0,08	0,5	0,015	0,015	12,0	9,0	0,5	44,5	0,5	22,0			0,6	0,006		0,9

Tabla 3.2: Aceros a estudio y sus principales componentes en %.

La incorporación de diferentes elementos aleantes, así como la diferente concentración de los mismos para los distintos tipos de aceros provoca la mejora de propiedades físicas de ellos y son componentes a tener en cuenta a la hora de efectuar un análisis de ciclo de vida de los aceros.

Por ello pasaremos a comentar los efectos que producen los principales componentes:

C: Es el principal componente en la composición de un acero y es el que define sus propiedades básicas, proporciona dureza y resistencia disminuyendo la ductilidad. Como se vio anteriormente, por su reducido tamaño atómico aparece en la red cristalina como elemento intersticial. Aporta grandes propiedades mecánicas y es un elemento formador de carburos a elevadas temperaturas. En los aceros inoxidables con alto contenido en Cr y Ni, es deseable reducir su concentración. La templabilidad en los aceros de fase

martensita predominante (martensíticos), es el C el que consigue esta propiedad¹⁸⁹.

Si: El silicio actúa como endurecedor del acero y tiene como mayor utilidad la desoxidación del mismo formando SiO_2 dando mayor solidez a la pieza fundida. Aumenta la resistencia de los aceros frente al O_2 y los gases oxidantes a elevada temperatura. Es un elemento que favorece la formación de ferrita.

Mn: El manganeso se utiliza para desulfurar el acero mediante la formación de MnS y por tanto evitar su incorporación como impureza metálica. Consigue aumentar la resistencia al desgaste y la dureza¹⁹⁰ consiguiendo la estabilización de austenita mediante la incorporación de cantidades superiores al 10% y por tanto la obtención de aceros austeníticos.

Cr: El cromo es el aleante mediante el cual, el acero, consigue las propiedades antioxidantes. Mediante el Cr, el acero se pasiva mediante una capa de Cr_2O_3 que recubre la superficie del acero y por tanto actúa como protección frente a determinados agentes agresivos externos. A mayor contenido en Cr, mayor es la protección frente a determinados tipos de corrosión¹⁹¹.

Mo: Es otro de los aleantes que se incorpora a determinados aceros inoxidable para evitar algunos tipos de corrosión. Mejora las propiedades mecánicas, la templabilidad del acero y su dureza, la resistencia al choque y evita la fragilidad provocada por el tratamiento de revenido.

W: El wolframio es un aleante que aumenta la dureza del acero, especialmente, a elevadas temperaturas. Forma, junto con el C, capas de carburos de WC que le permite ser resistente al desgaste.

V: El vanadio aumenta resistencia a la fatiga y la dureza a elevada temperatura, es un afinador de grano y como el W, es formador de carburos. Evita el fenómeno de envejecimiento de los aceros con bajo contenido en C.

¹⁸⁹ Inchaurza, A. “*Influencia de los elementos en aceros inoxidables y refractarios*”. Olsa (Olarra, S.A.): Vizcaya, 1971.

¹⁹⁰ Calvo Rodes, R. “*El acero, su elección y selección*”. INTA. Madrid, 1956.

¹⁹¹ Beddoes J. and Parr J.G. “*A Review of Stainless Steel: What are they; What they do. Introductions to Stainless Steel*”. American Society for Microbiology: Washington D.C., 1.999.

Nb: Evita la generación de carburos de cromo y evitando la sensibilización del acero, por tanto, proporciona al acero elevada resistencia a la corrosión intergranular.

N: Los efectos que provoca en el acero son parecidos a los del C, aumenta la dureza del acero mediante la formación de nitruros, es un elemento afinador de grano disminuyendo el tamaño de grano de ferrita. Favorece la deformación de los aceros ferríticos y austeníticos. Reduce la posibilidad de aparición de corrosión por picaduras para cantidades cercanas al 0,25%.

Ti: El titanio se agrega a los aceros inoxidables que contienen Ni para, al igual que sucede con el Nb, estabilizar el C y formar carburos de titanio que evitan la formación de carburos de cromo y por consiguiente perder la propiedad principal de un acero inoxidable. Al igual que el N, es un elemento afinador de grano. En los aceros ferríticos, evita la aparición de la fase martensita y por ello favorece la soldabilidad. Otra propiedad es la de favorecer la desoxidación de los aceros y por ello estabiliza el carbono.

P: El fósforo favorece la segregación aumentando la dureza de la fase ferrítica e incrementa la fragilidad del acero, se trata de un elemento, generalmente, perjudicial.

S: Al igual que el fósforo, el azufre fragiliza el acero, especialmente en caliente, se añade en pequeñas cantidades para favorecer la maquinabilidad.

Ta: El tantalio evita la formación de carburos que se generan a elevada temperatura para aceros inoxidables con alto contenido en Cr y Ni y por ello evita, en gran medida, el fenómeno de corrosión intergranular.

Co: La adición de cobalto a los aceros inoxidables provoca el aumento de la dureza y la resistencia a la corrosión gracias a la ayuda para la formación de carburos de titanio, molibdeno y wolframio.

Una vez comentadas las propiedades de los diferentes elementos que componen un acero inoxidable, así como las proporciones en que se encuentran en cada uno de ellos, se procederá al estudio y análisis de ciclo de vida comparativo, de los aceros implicados en los sistemas considerados en esta tesis, que servirá como introducción a los ACV de las centrales termo solares propuestas en esta tesis.

El análisis se efectuará utilizando la herramienta informática SimaPro 8.0 y se inicia tomando como unidad funcional 1 kilogramo de cada uno de los aceros con la consideración, según establece la norma ISO 14044, de que los aleantes en un porcentaje menor al 5% en peso y no perjudiciales para la salud humana, no se tienen en cuenta a la hora de introducir el inventario en el programa, al final y mediante una comparativa se observará cuál de ellos aportará un menor impacto ambiental. Otra consideración a tener en cuenta y siguiendo las recomendaciones de la SETAC, se considerará que el 20% de material considerado, es reciclado.

El método a seguir será el ReciPe que, como se comentó anteriormente, es el método sucesor de Eco indicador 99 y CML con el propósito de integrar los enfoques orientados a los “problemas” mediante las categorías de impacto tomando el punto medio, del método CML con unos resultados que aportan un valor de incertidumbre bajo, con el inconveniente que conduce a la presentación de muchas categorías de impacto, de lo que se obtienen unos resultados de difícil interpretación. El enfoque orientado a los daños, del método Ecoindicador 99, arroja resultados en, tan solo, tres categorías de impacto, lo que facilita en gran medida la interpretación de resultados con una mayor incertidumbre.

ReCiPe, engloba ambos contenidos y adopta tanto el punto medio, en el problema orientado, como el punto final hacia el daño orientado. Los factores de caracterización correspondientes al punto medio, se multiplican por los factores de daño con el fin de conseguir los valores de caracterización del punto final.

Como se describió anteriormente, este método, presenta dos tipos de categorías de impacto con sus factores de caracterización correspondientes. A nivel de punto medio 18 categorías de impacto, ya mostradas, y a nivel de punto final tres categorías de impacto que se normalizan y ponderan en una sola cuenta.

En cuanto a la elección de valores, hay que contemplar que tanto los mecanismos ambientales como los modelos de daño son motivo de incertidumbre y por eso se decidió agrupar diferentes fuentes de incertidumbre y perspectivas según la llamada “Teoría Cultural” desarrollada por Thomson en 1990¹⁹² en la que se distinguen las perspectivas “Individualista (I), Jerárquica (H) e Igualitaria (E)” que no representan modelos de

¹⁹² Thompson M., Ellis R. and Wildavsky A., *Cultural Theory*. Westview Press, Boulder, Co, 1990.

comportamiento humano, pero se basan en las siguientes perspectivas:

Individualista (I): Esta perspectiva se basa en un interés cortoplacista, es una situación de optimismo tecnológico en lo que se refiere a la adaptación humana.

Jerárquica (H): Perspectiva orientada a principios políticos respecto a plazos y otras cuestiones.

Igualitaria (E): Se trata de la perspectiva más equilibrada que tiene en cuenta plazos más largos y tipos de impacto sin establecer completamente y pendientes de indicaciones disponibles.

Los factores de caracterización de este método para el punto medio corresponden a:

- *Agotamiento de la capa de Ozono*: Representa la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera por el efecto de las emisiones antropogénicas de las diferentes sustancias que la originan (ODS). Viene expresada en año/Kg_{eq} de CFC-11.
- *Toxicidad Humana y Eco toxicidad*: Este factor, explica la persistencia ambiental, como destino, y la acumulación de determinada sustancia química toxica, como efecto, en la cadena alimentaria humana. Se expresa en año/Kg_{eq}.1,4 diclorobenceno (14 DCB)
- *Radiación ionizante*: Representa el grado de exposición a ella y se expresa en año/Kg_{eq}.uranio235.
- *Oxidación Fotoquímica*: Es el factor de caracterización que representa la formación de oxidantes fotoquímicos y se define como el cambio marginal promedio en 24 horas, de la concentración de ozono en la zona europea expresado en Kg/m³, debido a un cambio, igualmente marginal, en las emisiones de determinada sustancia expresado en Kg/año.
- *Formación de partículas sólidas*: Indica la fracción de ingesta de partículas de tamaño PM10 expresado en año/Kg_{eq}.PM10.
- *Cambio Climático*: Indica el potencial de calentamiento global expresado en año/Kg_{eq}.CO₂.

- *Ocupación del terreno urbano y agrícola*: Indica la ocupación de alguno de ellos durante un tiempo determinado. Las unidades en que se expresa son $m^2/año$.
- *Transformación natural del terreno*: Se trata de la cantidad de terreno natural ocupado y transformado durante determinado tiempo. Se expresa en $m^2/año$.
- *Eutrofización Marina*: Explica la persistencia ambiental en la emisión de N de los nutrientes que lo contienen y se expresa en $año/Kg_{equ}.N_2$ de agua dulce.
- *Eutrofización de agua dulce*: Explica la persistencia ambiental en la emisión de P de los nutrientes que lo contienen y se expresa en $año/Kg_{equ}.P$ de agua dulce.
- *Agotamiento de minerales y combustibles fósiles*: Se corresponde con la cantidad de combustible fósil extraído, basado en los de menor poder calorífico. Se expresa en Kg_{equ} de petróleo (1 Kg_{equ} de petróleo tiene un poder calorífico inferior a 42 MJ).
- *Agotamiento mineral*: Se refiere a la disminución en el grado de determinado mineral y se expresa en Kg_{equ} de Fe.
- *Agotamiento de agua dulce*: Se refiere a la cantidad de agua dulce consumida y se expresa en m^3 .

Los factores de caracterización de análisis de daños basados en el punto final se componen de:

- *Salud Humana*: Se expresa como el número de años de vida perdidos/vividos con discapacidad combinados como años de vida ajustados por discapacidad (DALYs), siendo un índice el Banco Mundial y la OMS. Se expresa en años.
- *Ecosistemas*: Representa la pérdida de especies en un área determinada y durante un período de tiempo. Se expresa en años.
- *Costes de excedentes de recursos*: Se representan como los costes de excedentes de producción futura, en un espacio de tiempo determinado y considerando una tasa de descuento del 3%. Se expresa en 2.000 \$ norteamericanos.

La normalización se basa en el informe de Sleeswijk¹⁹³. En Sima Pro, las cifras de Normalización se aplican mediante recalcuho por ciudadano y la población utilizada de EU25 + 3 es la correspondiente a 464.036.294 ciudadanos teniendo presente que en el mundo se calcula una cifra de 6.055.000.000. El uso de minerales y la transformación del suelo no se contemplan y por tanto se recurre a los datos de USGS (2000) y la FAO para la transformación del suelo en el período 2000 y 2005.

La ponderación, para este método, se realiza a nivel de categoría de daño, nivel de punto final (ISO) y existe un panel para las tres categorías y para cada punto de vista, un conjunto de ponderación específica. Como sistema de ponderación, se toma el resultado promedio de la evaluación de dicho panel. En ReCiPe, se selecciona como predeterminada la versión *jerárquica* estando aceptada científicamente y políticamente.

Los materiales seleccionados para el desarrollo de esta tesis forman parte de los componentes principales de las CSP de receptor central de torre seleccionadas y adecuados a las altas temperaturas de trabajo y ciclos, hecho por el que sufren un deterioro por los procesos de corrosión a elevada temperatura mediante la formación de diferentes compuestos explicados con anterioridad.

Los materiales seleccionados han sido el acero austenítico AISI 347H y la aleación base Ni resistente a elevada temperatura INCONEL 617 en base a sus buenas características mecánicas y su resistencia a la corrosión a elevada temperatura. Mediante el proceso de ACV con el programa informático SimaPro 8.0 se realizará un análisis comparativo de ambos para comprobar cuál de ellos presenta un menor impacto medioambiental teniendo en consideración los diferentes indicadores de impacto correspondientes al método seleccionado, ReCiPe, explicado ampliamente en capítulos anteriores.

La composición de ambos materiales se puede consultar en la Tabla 7 con los correspondientes porcentajes de cada elemento aleante, así como los efectos químicos y físicos que producen sobre él explicados en el apartado 3.2.

El estudio de estos materiales mediante Sima Pro 8.0 se ha llevado a cabo

¹⁹³ Sleeswijk A.W., van Oers L.F., Guinée J.B., Huijbregts M.A.J. “Normalization in Product Life Cycle Assessment: An LCA of the Global and European Economic Systems in the year 2000”. Science Total Environmental N°390 (1), 227-240, 2007.

mediante la introducción de las entradas para cada uno de los materiales al objeto de realizar un análisis comparativo que nos ha permitido comprobar el impacto medioambiental.

Como unidad funcional se ha tomado 1 Kg. de material de cada una de las aleaciones obteniéndose diversos gráficos y tablas de datos que determinarán el impacto con diferentes medios analíticos como la ponderación, evaluación del daño y contribución de los diferentes procesos.

Para comprobar la influencia sobre el medio ambiente se ha realizado un estudio comparativo mediante el método ReCiPe “Endpoint” y perspectiva cultural H (Jerárquica) en la que su visión de la naturaleza es de firmeza dentro de unos límites controlados por los gobiernos y la legislación vigente. Este método permite una fácil agrupación de las categorías de impacto en puntos intermedios y finales mediante la consecución de tres pasos para el cálculo del eco indicador y que se corresponden con:

- Inventario: Determinación de las emisiones del material que pueden dañar el medio ambiente y como base de datos se ha recurrido a IDEMAT que aporta la ingeniería del material, la energía y el transporte.
- Daño: Obtención de los daños ocasionados por las emisiones hacia las categorías de salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos naturales determinando el deterioro ambiental en el aire, agua y tierra.
- Peso: Se trata de un valor dimensional del perjuicio ambiental de cada una de las tres categorías de impacto en función de la cantidad de materia y energía que intervienen en cada caso.

Mediante este método se realiza el cálculo del impacto ambiental en forma de eco indicadores para los diferentes materiales. En el desarrollo del ACV se ha tenido en cuenta la cadena de proceso considerando el transporte, la energía, la reutilización de los materiales, etc. basándonos en la base de datos IDEMAT.

En la Tabla 8, se aportan las composiciones de los materiales considerados con los elementos aleantes principales que se han tenido en cuenta para realizar este análisis comparativo.

Para cada una de las categorías contempladas, los datos que se obtienen presentan diferentes unidades como son, DALY para los relacionadas con la salud humana, especies·yr para la calidad del ecosistema y \$ para los recursos y por eso se ha de seguir el criterio de Normalización.

3.3.1.- Análisis de Ciclo de Vida acero inoxidable AISI 347H

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero inoxidable AISI 347H ha sido realizado mediante el método ReCiPe, explicado anteriormente, a partir de los datos de inventario correspondientes a la tabla de composición de los diferentes elementos que contiene y teniendo en cuenta como unidad funcional 1 kg. Los datos de inventario darán como resultado los efectos, como emisiones y recursos, causados por los diferentes elementos involucrados en el material considerado y dichos efectos son específicos para los resultados medioambientales para las diferentes categorías.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	N (%)	Ta (%)
0,06	2,0	0,045	0,030	1,0	10,00	18,00	0,48	0,02	0,5

Los valores obtenidos son función de la base de datos seleccionada, Ecoinvent y a partir de la caracterización vamos a poder identificar, para cada categoría de impacto, las cantidades correspondientes a cada una de ellas con sus respectivas unidades. Estos datos son reflejados en la Tabla 3.3 inferior.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	6,73
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	4,3·10 ⁻⁷
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	0,167
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	0,00761
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,0377
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,0461
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	1,52
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	0,234
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	0,0914
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,00113
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	254
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	14,2
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	1,71

Tabla 3.3: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para el acero AISI 347H
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Los pasos seguidos para el análisis se hicieron de acuerdo a la norma ISO 14042 y se obtuvo un gráfico de normalización, Gráfico 3.3, en el que se aprecia que las categorías de impacto con mayor contribución son las correspondientes a la Toxicidad Humana que toma un valor de 0,00761 kg.1,4-DB_{equiv} en la que el Ni es el metal de mayor incidencia.

El Gráfico 3.3 muestra el análisis de 1 kg. de acero AISI 347H con método analítico ReCiPe para un punto medio (Midpoint). En la confección del gráfico aparecen las categorías de impacto asociadas al método seleccionado con su respectivo aporte de los elementos que componen el acero, así como los procesos implicados en su obtención más significativos y que se pasan a comentar de manera individual:

- *Categoría de cambio Climático*: En esta categoría de impacto se aprecia que el principal contribuyente corresponde a la producción de Cromo tomando el valor de producción en Europa. El resto de elementos y procesos no presentan contribución relevante para ella.
- *Categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono*: En esta categoría de impacto, la contribución de elementos y procesos implicados en el acero AISI 347H, es despreciable y por lo tanto no se tienen en cuenta.
- *Categoría de Acidificación Terrestre*: En esta categoría de impacto figuran, principalmente, dos contribuyentes. Por un lado y como responsable del más contributivo a esta categoría se encuentra el Níquel en la fase de extracción de mineral sulfuroso, su proceso de obtención y su compra considerándola en el mercado global. Por otro lado, y como segundo responsable de la Acidificación Terrestre se encuentra el proceso de producción del Cromo como responsable de este valor en esta categoría.
- *Categoría de Toxicidad Humana*: Esta categoría de impacto es la segunda más afectada para el acero AISI 347H y es debida principalmente, al igual que para la de Acidificación Terrestre, a la contribución del Níquel por procesos y mercado y a la producción de Cromo. Se puede observar que presenta cierta aportación a ella la incorporación de arrabio obtenido en el mercado global. Los valores para esta categoría son muy superiores a los correspondientes en la Acidificación Terrestre.
- *Categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos*: Esta categoría de impacto representa una importancia similar a la categoría de Cambio Climático, pero aquí las

principales aportaciones a ella son debidas al Níquel en cuanto a procesos y mercado, y en menor valor el correspondiente al mercado global de la incorporación de chatarra de hierro clasificada.

- *Categoría de Formación de Partículas:* Para esta categoría de impacto los principales responsables de aporte a ella son los procesos de extracción y obtención del Níquel y mercado global y la producción de Cromo.

- *Categoría de Ionización por Radiación:* Las radiaciones ionizantes son fotones o partículas emitidas por elementos radioactivos o en procesos atómicos que poseen energía suficiente como para ionizar átomos o moléculas. En esta categoría de impacto la principal contribución corresponde al proceso de obtención de Cromo.

- *Categoría de Ocupación de Suelo Agrícola:* Para esta categoría de impacto la contribución principal corresponde al mercado global de la cal viva, pero presenta un valor prácticamente despreciable.

- *Categoría de Ocupación de Suelo Urbano:* Al igual que la anterior, para esta categoría de impacto, la principal contribución corresponde al mercado global de la cal viva, pero con un valor prácticamente despreciable.

- *Categoría de Transformación del Suelo Natural:* Los responsables de la contribución en esta categoría de impacto corresponden a la producción de Cromo, al Níquel en sus procesos de extracción del mineral, obtención del metal y mercado global, el arrabio para el mercado global y la cal viva en trozos. Esta categoría es una de las principales contribuyentes al proceso.

- *Categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos:* Para esta categoría de impacto no aparecen contribuciones reseñables al proceso.

- *Categoría de Agotamiento de Metales:* Se trata de la categoría de impacto más contributiva para este acero. Los procesos responsables de ella son los debidos a la obtención de Cromo, la del Níquel en todos sus procesos de extracción, obtención y mercado global, la producción de Manganeso y la influencia del mercado global de arrabio.

- *Categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles:* En esta categoría de impacto los

principales responsables son la producción de Cromo, la chatarra de hierro y el arrabio necesario.

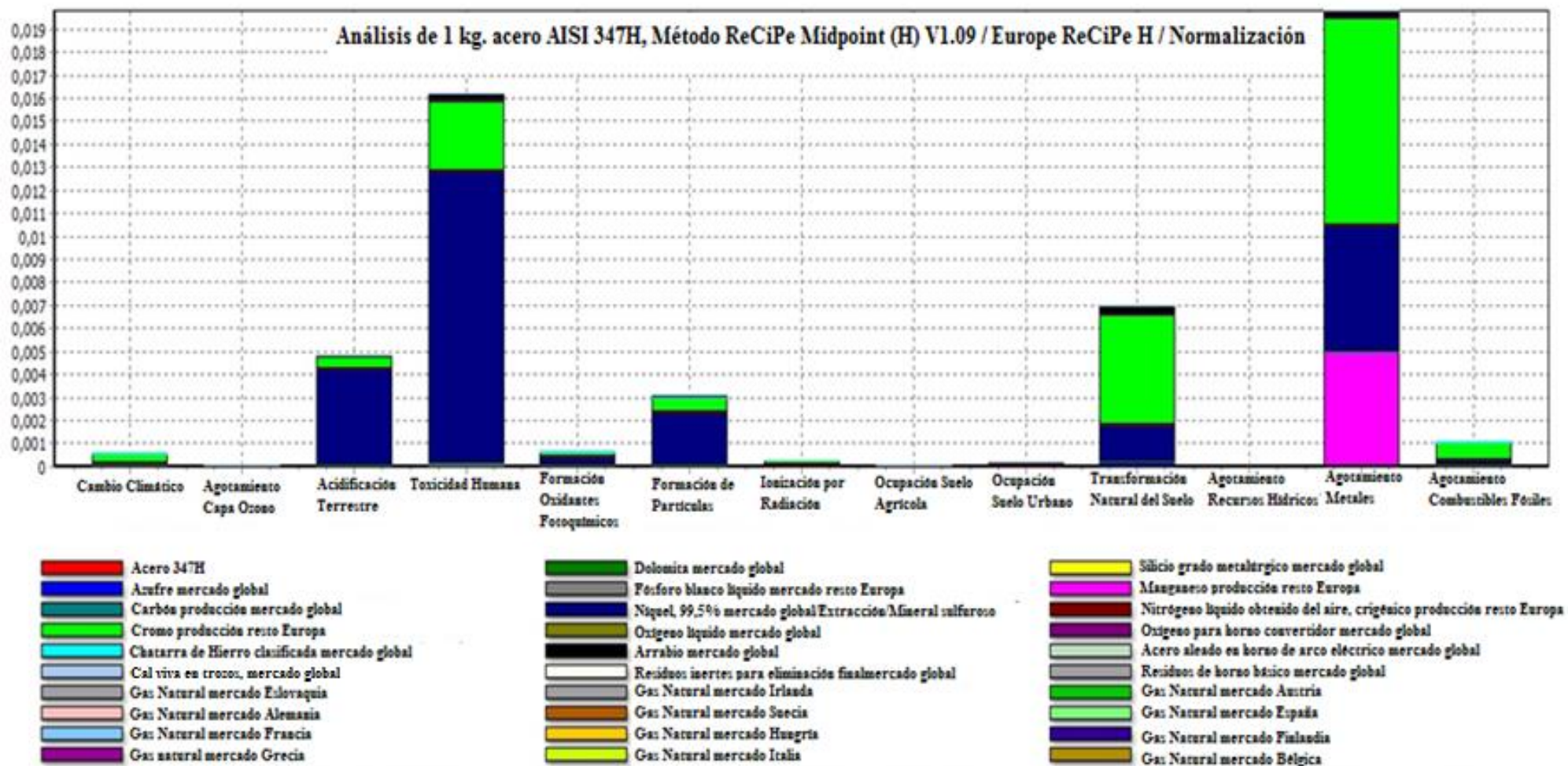


Gráfico 3.3: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de acero AISI 347H con las diferentes categorías de impacto.
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0.

La categoría correspondiente al Agotamiento de Metales que arroja un valor, según la Tabla 3.3 de caracterización de 14,2 kg.Fe_{equiv}, es la de mayor impacto, en la que sobresalen las cantidades de Cr, y en menor medida, pero también a tener en cuenta las aportaciones de los metales Ni y Mn.

En el Gráfico 3.3 correspondiente a la Normalización, se aprecia la aportación de los diferentes elementos considerados en el acero AISI 347H, así como los procesos implicados en la obtención y procesamiento de los mismos. Como se ha indicado anteriormente, la mayor contribución corresponde al agotamiento de metales siendo el de mayor aporte el Cr seguido por el Ni y Mn.

La siguiente categoría con cierto peso es la correspondiente a la Toxicidad Humana y en ella se observa que es el Ni en su proceso de extracción de la mina es el de mayor impacto seguido del Cr por el proceso de obtención con un valor algo menor, pero a tener en cuenta.

Para la categoría correspondiente a la Transformación del Suelo Natural el elemento de mayor importancia es el de obtención del Cr seguido por el proceso de extracción del Ni.

En cuanto a la categoría de Acidificación Terrestre debida a la deposición de ácidos que proceden de la liberación hacia la atmósfera, al suelo o agua, de óxidos de nitrógeno y azufre que pueden variar la acidez del medio provocando deforestación y el daño a los materiales. La mayor contribución al impacto es la que aporta el proceso de extracción del Ni y en menor medida la producción de Cr.

Otra categoría de impacto que se ve afectada es la correspondiente a la Formación de Partículas que es debida principalmente a los procesos de extracción del Ni y a la producción de Ni.

La categoría de impacto correspondiente al Agotamiento de Combustibles Fósiles se ve afectada, principalmente, por el proceso de obtención del Cr.

La categoría correspondiente al cambio climático responsable del calentamiento del planeta por el efecto invernadero se ve afectada por el proceso de obtención del Cr para este material.

No se van a considerar las categorías correspondientes a la Ocupación de terreno Urbano, Radiación Ionizante y Formación Fotoquímica de Oxidantes al presentar valores de impacto muy reducidos.

Dada la importancia de la categoría de impacto correspondiente al Agotamiento de Metales será esta la que se va a tener en cuenta a la hora del estudio medioambiental con el árbol de contribución que pasamos a estudiar seguidamente mediante el Gráfico 3.4 y que nos va a permitir observar, de manera porcentual, las mayores contribuciones de los elementos presentes en el acero.

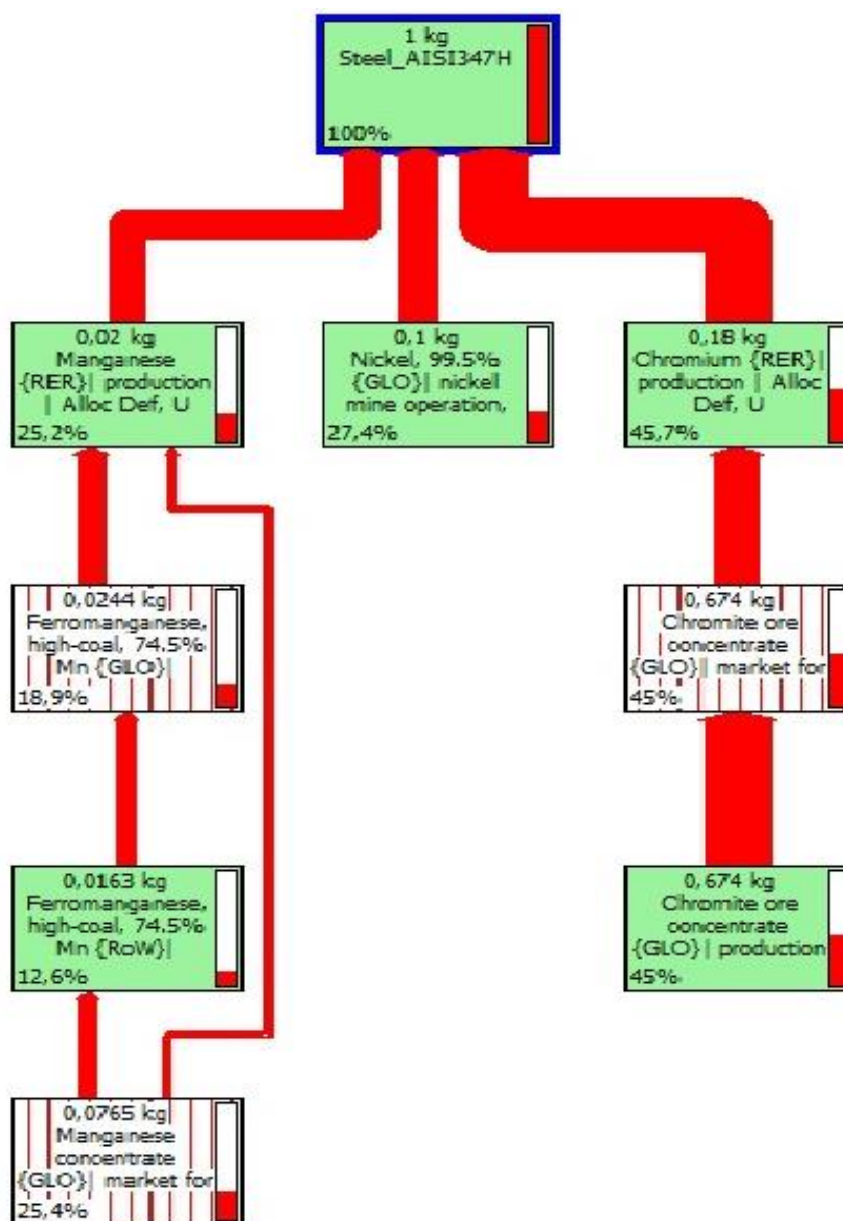


Gráfico 3.4: Árbol de contribución de la Categoría de Impacto Agotamiento de Metales para el acero AISI 347H
Fuente: Elaboración propia mediante Sima pro 8

El Agotamiento de Metales se debe a la demanda de los procesos industriales que precisan de una amplia variedad y cantidad de materiales que pueden ser elementos químicos, minerales o rocas. El proceso de extracción de estos metales depende de cómo se encuentran en la naturaleza generalmente formando yacimientos o bien mediante procesos de erosión, transporte y sedimentación, en los que los materiales se encuentran lejos del yacimiento de origen.

El análisis de contribución se efectúa mediante un árbol en el que se aprecian los elementos y procesos que contribuyen a un mayor impacto medioambiental. Dicha contribución viene expresada en términos porcentuales respecto al indicador único.

En este caso, el valor de corte elegido ha sido del 11%. En todo el árbol, se aprecian una serie de flujos de trazo con mayor y menor grosor, que nos indican qué elementos o procesos van a influir en mayor o menor medida sobre el impacto medioambiental del material.

Como puede observarse, el Cr es el elemento que presenta un trazado más grueso debido al su proceso de producción y es por ello que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 45.7%. A su vez, de todos los elementos que componen el Cr, el impacto mayor es el ocasionado por la cromita (mineral concentrado de Cromo) para el mercado global (45%). Por debajo de este, se encuentra el subproceso que corresponde a la extracción y que tiene gran influencia dado el trazo grueso que figura y cuyo impacto correspondiente a la extracción de la cromita en el mercado global representa el 45%.

El Ni es el segundo elemento en importancia arrojando un peso de impacto en porcentaje del 27,4% debido principalmente a la operación extractiva del metal en el mercado global. A poca distancia del Ni se encuentra el Mn como otro elemento de gran peso sobre el impacto y que alcanza un valor porcentual de 25,2% debido principalmente a su producción.

Para la producción del Mn, se parte del Mn concentrado desde el que se generan dos vías hasta el proceso de producción del mismo. Por un lado, y dependiendo de la riqueza del mineral, se pasaría directamente hasta el proceso de producción que, como se aprecia en el árbol, el trazo es menos grueso que para el siguiente proceso que se va a comentar y que representaría por tanto un menor impacto ambiental con una contribución del 25,4%. La segunda vía vendría iniciada por el Mn en menor concentración y que se

encuentra con alto contenido en carbón y en una concentración de 74,5% en Mn considerándolo para RoW (resto del mundo) y que representaría un impacto del 12,6%. De aquí pasaría al mismo subproceso que el anterior pero enfocado hacia el mercado global con un impacto del 18,9% para terminar en el subproceso de producción al igual que la vía anterior.

3.3.2.- Análisis de Ciclo de Vida Superaición HRSA INCONEL 617

Al igual que en el caso del ACV del acero inoxidable AISI 347H, para la superaición HRSA INCONEL 617 se ha utilizado el mismo método ReCiPe y misma base de datos Ecoinvent para esta aleación, aportando los elementos, en sus respectivos porcentajes, que no se encontraban en ella. La tabla de composiciones se muestra a continuación y presenta algunas diferencias con la correspondiente al acero AISI 347H.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Mo(%)	Si(%)	Ni(%)	Cu(%)	Cr(%)	B(%)	Ti(%)	Al(%)
0,08	0,5	0,015	0,015	12,0	9,0	0,50	44,5	0,50	22,00	0,006	0,60	0,90

A simple vista se observa que los contenidos en Mn difieren en ambas composiciones, siendo muy superior en la correspondiente al INCONEL 617. La cantidad de Ni cuadruplica a la que estaba presente en el acero AISI 347H y la de Cr es algo superior a la que aparecía en este. Haciendo un análisis rápido se puede deducir que las categorías de impacto en las que intervengan estos tres elementos, presentarán índices más elevados que los que exhibían el acero AISI 347H.

Por otro lado, en la composición de la superaición INCONEL 617 aparecen nuevos elementos, como son el Co (12%), el Mo (9%) y otros como el Ti y Al en menor proporción, que no están presentes en el acero AISI 347H y que como es de esperar, cuando se realice la caracterización y normalización tendrán su influencia en los resultados medioambientales para las diferentes categorías.

Mediante la Tabla 3.4 de caracterización, que se presenta en la parte inferior, se obtienen al igual que en el caso del acero AISI 347H las diferentes categorías de impacto con sus correspondientes unidades y su valor en la columna de la derecha. Comparando esta con la obtenida para el acero AISI 347H se observa que, por norma general, los valores de las diferentes categorías de impacto son superiores.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	16,7
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	9,4·10 ⁻⁷
Acidification Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,48
Toxicity Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	419
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,259
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,00606
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	0,416
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	2,99
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	0,783
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,949
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	0,00528
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	506
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	106

Tabla 3.4: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la superaleación INCONEL 617
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Observando la tabla de caracterización y comparando los valores con los obtenidos en el acero AISI 347H se aprecian determinados valores de categoría de impacto para el INCONEL 617 que alcanzan cifras muy elevadas respecto al primero. Dentro de las más significativas se encuentra la correspondiente al consumo de agua alcanzando el valor de 506 m³ y el consumo de metales que llega hasta los 106 kg.Fe_{equiv}. Para nuestro estudio, se ha seleccionado otra categoría que presenta un incremento considerable y que se considera muy importante, se trata de la categoría de impacto correspondiente a la Toxicidad Humana que alcanza un valor de 419 kg.1,4-DB_{equiv} y por tanto será la categoría a tener en cuenta al utilizar la normalización.

El Gráfico 3.5 muestra el análisis de 1 kg. de HRSA INCONEL 617 con método analítico ReCiPe para un punto medio (Midpoint). En la confección del gráfico aparecen las categorías de impacto asociadas al método seleccionado con su respectivo aporte de los elementos que componen la superaleación, así como los procesos implicados en su obtención más significativos y que se pasan a comentar de manera individual:

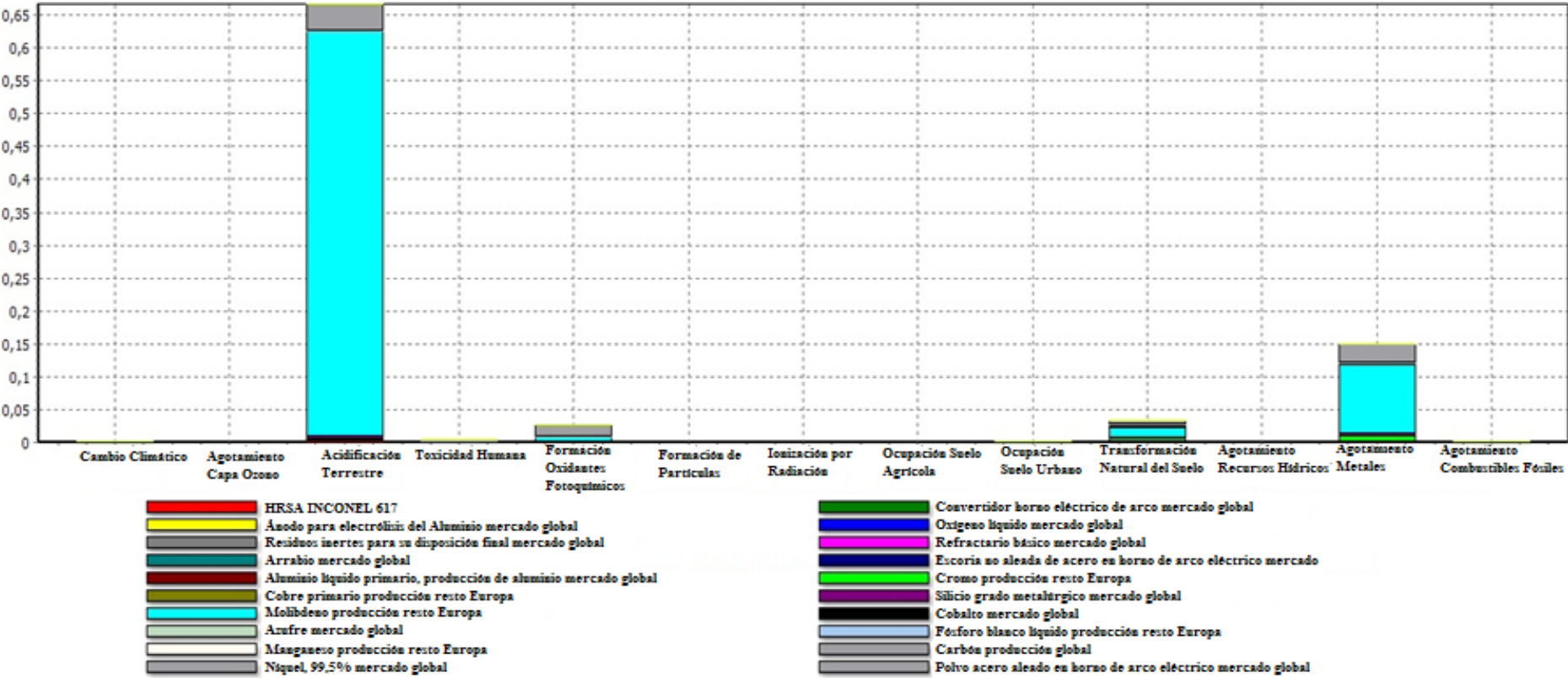
- *Categoría de cambio Climático*: En esta categoría de impacto se aprecia que el principal contribuyente corresponde a la producción del ánodo para el proceso de electrólisis del Aluminio tomando el valor de producción en un mercado global. El resto de elementos y procesos no presentan contribución para ella.

- *Categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono*: En esta categoría de impacto no existe contribución relevante de ninguno de los elementos y procesos implicados en el HRSA

INCONEL 617, por lo tanto, no se tienen en cuenta.

- *Categoría de Acidificación Terrestre*: Esta categoría de impacto no se tiene en cuenta por no presentar contribución alguna de ninguno de los elementos y procesos involucrados en el material.
- *Categoría de Toxicidad Humana*: Esta categoría de impacto es la más significativa en el proceso. Las contribuciones responsables son las debidas a la producción de Molibdeno, a la obtención de Níquel y al Cobalto considerado para un mercado global.
- *Categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos*: Esta categoría de impacto representa una importancia muy pequeña y es la aportada por la electrólisis de Aluminio en la obtención del ánodo. Su aporte es muy pequeño.
- *Categoría de Formación de Partículas*: Para esta categoría de impacto las principales contribuciones corresponden a los procesos de obtención del Níquel y en menor medida a la del Molibdeno.
- *Categoría de Ecotoxicidad Terrestre*: Existe contribución a esta categoría, pero es tan pequeña que no se aprecia contribución de ninguno de los elementos y procesos.
- *Categoría de Ionización por Radiación*: Al igual que para la categoría de Ecotoxicidad Terrestre, existe contribución, pero no se aprecia proceso ni elemento que aporten valores a ella.
- *Categoría de Ocupación de Suelo Agrícola*: Para esta categoría de impacto no se aprecian valores contributivos reseñables por parte de ninguno de los procesos ni elementos involucrados en el material.
- *Categoría de Ocupación de Suelo Urbano*: Para esta categoría de impacto, la principal contribución corresponde a la producción del ánodo para la electrólisis del Aluminio, aunque el valor es mínimo.
- *Categoría de Transformación del Suelo Natural*: Los responsables de la contribución en esta categoría de impacto corresponden a la producción de Molibdeno, Níquel y la electrólisis del Aluminio.

- *Categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos*: Para esta categoría de impacto no aparecen contribuciones reseñables al proceso.
- *Categoría de Agotamiento de Metales*: En esta categoría de impacto las principales contribuciones son debidas a la producción de Molibdeno, Níquel, Cromo y en menor medida la del Cobalto.
- *Categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles*: En esta categoría de impacto la principal contribución corresponde a la obtención del ánodo mediante la electrólisis del Aluminio.



Análisis 1 kg. HRSA INCONEL 617, Método ReCiPe Midpoint (H) V1.09 / Europe ReCiPe H/ Normalización

Gráfico 3.5: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de superaleación INCONEL 617 con las diferentes categorías de impacto.
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

A partir del Gráfico 3.5 correspondiente a la normalización, en la página superior, se observa que las categorías de impacto más representativas son las que representan la Toxicidad Humana, el Consumo de Metales y la Transformación Natural del Terreno, por este orden.

Como se vio en capítulos anteriores, la Toxicidad Humana contempla los efectos sobre el ser humano y los ecosistemas, por parte de las sustancias tóxicas ambientales llegando a adquirir gran importancia debido al factor destino por su traslado por medios diferentes.

En el Gráfico 3.5 se observa que en la categoría de Toxicidad Humana el principal responsable de su elevado valor se debe al proceso de producción de Molibdeno (Mo) considerando el mercado europeo, que era uno de los principales componentes de la aleación INCONEL 617 y cuyas propiedades se estudiaron anteriormente. Como segunda incidencia importante se encuentra la debida a la producción de Níquel teniendo en cuenta el mercado global y por último se encuentra la producción de Cobalto también considerando el mercado global.

Para el caso de la categoría correspondiente al agotamiento de Recursos Abióticos y en concreto el de metales para nuestro caso, la incidencia mayor es debida a la producción de Molibdeno y en menor medida la correspondiente a la producción de Ni y en menor medida la del Cromo para un mercado europeo.

Para el caso de la categoría de impacto correspondiente a la Transformación del Suelo Natural debido al cual se origina un cambio en la superficie del suelo desde un estado original a otro estado alterado que puede ser temporal o permanente y aquí el componente que ocasiona un mayor impacto vuelve a ser el debido a la producción de Molibdeno y en menor medida la de Níquel

Para la categoría de impacto de Formación de Partículas, la tendencia es contraria a la correspondiente a la Transformación del Suelo Natural. Los implicados son los mismos, pero con mayor incidencia por parte del proceso de producción de Níquel y con menor incidencia de la producción de Molibdeno como responsables de la formación de partículas.

En este caso se obtuvieron unos valores muy superiores de toxicidad humana que del resto de categorías de impacto. Por ello se elaboró el árbol de procesos de esta categoría.

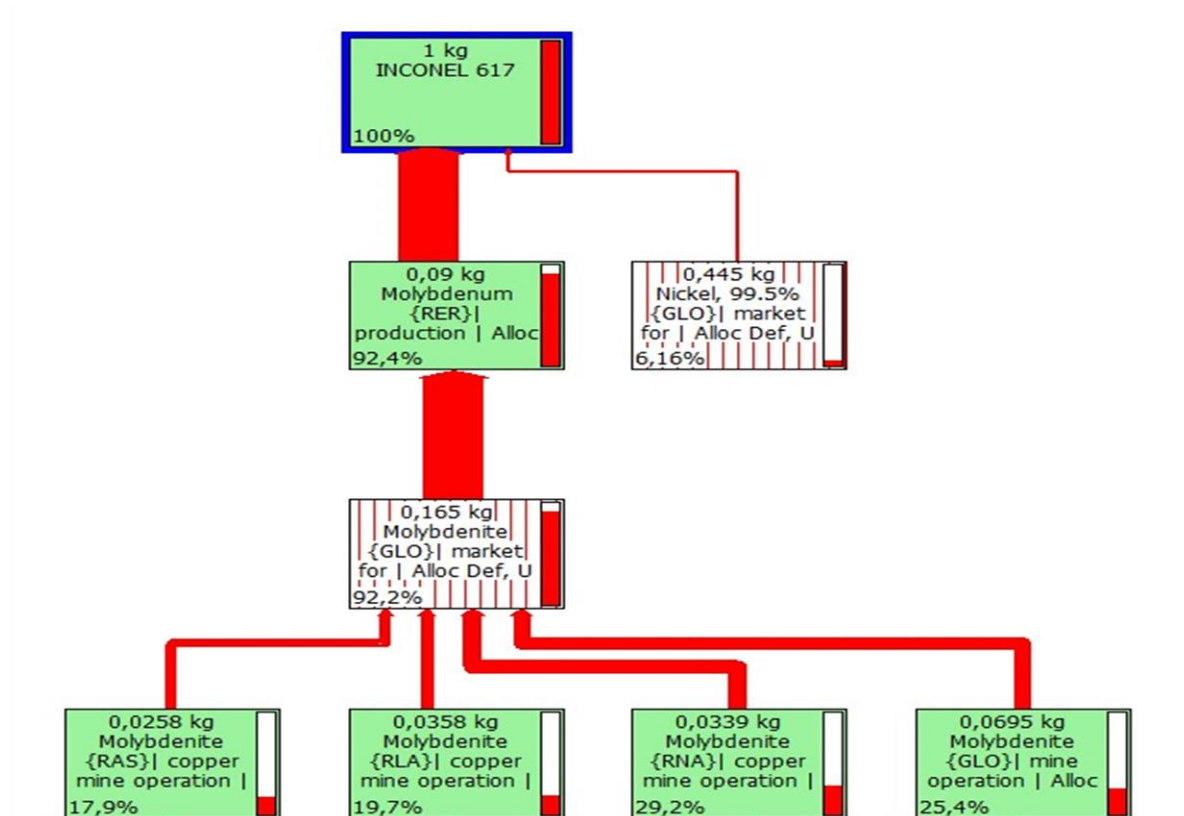


Gráfico 3.6: Árbol de contribución de la Categoría de Impacto Toxicidad Humana para la superaleación INCONEL 617
Fuente: Elaboración propia mediante Sima pro 8

En el árbol de contribución, Gráfico 3.6, obtenido a partir de la normalización en la categoría de Toxicidad Humana, para un valor de corte del 5.74%, se aprecian los flujos de trazo de mayor grosor para la aportación en la producción de Mo con una contribución del 92.4% y el mercado de materias primas con el 92.2%. La contribución del Ni es muy inferior aportando un porcentaje de incidencia del 6.16% debido al mercado global, que nos indica qué metales van a influir en mayor o menor medida sobre el impacto medioambiental del material.

A partir del árbol de contribución y en cuanto al Mo, los subprocesos con mayor influencia se encuentran en los diferentes mercados que se han tenido en cuenta a la hora de interpretar el impacto medioambiental de este elemento. En la base del árbol se observa que se han tenido en cuenta las operaciones mineras para la extracción del mineral en base a los datos aportados por Austria, con un impacto del 17,9%, los aportados por Laos

con una incidencia del 19,7%, Los aportados por Namibia con una incidencia del 29,2% y para una extracción global que representa el 25,4%.

Se aprecia como ese 92, 4% de contribución al impacto por parte del Mo viene determinado en su mayor medida por la molibdenita en el mercado (un 92,2% de ese 92,4%).

La influencia sobre la Salud Humana de los principales elementos constituyentes de esta superaleación se resume según sigue:

Molibdeno (Mo): Su incorporación al organismo puede deberse a la exposición frente a los compuestos que forma, especialmente, cuando se utiliza a elevada temperatura como es el caso de los hornos eléctricos. La exposición al disulfuro de molibdeno, en forma de hexacarbonilo y en presencia de los productos de degradación como puede suceder en la galvanoplastia con las nieblas de $\text{Mo}(\text{OH})_3$ o humos de MoO_3 que sublima a temperaturas superiores a 800°C , pueden ser procesos peligrosos para la salud.

Estudios realizados sobre animales, explicaron la elevada toxicidad de los compuestos formados con este metal pesado cuyos efectos eran irritación gastrointestinal, diarrea, coma y muerte por insuficiencia cardíaca. Los trabajadores expuestos al Mo y al MoO_3 en concentraciones de entre 1 y 19 mg.Mo/m^3 durante un período comprendido entre 3 y 7 años desarrollaron neumoconiosis. La inhalación de polvo de Mo de las aleaciones o carburos puede causar la enfermedad pulmonar por metales pesados

El riesgo derivado de la exposición es muy variable. Los compuestos insolubles de molibdeno, como el disulfuro de molibdeno y muchos de sus óxidos y haluros, se caracterizan por su baja toxicidad; sin embargo, los compuestos solubles, es decir, aquellos en los que el molibdeno se encuentra en forma de anión como el molibdenato sódico ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), son considerablemente más tóxicos y la exposición al trióxido de molibdeno produce irritación ocular, de las mucosas de la nariz y la garganta. Un síntoma característico de la intoxicación por molibdeno es la anemia.

Níquel (Ni): Los riesgos para el hombre derivados de la exposición profesional a los compuestos de níquel son principalmente alergias, rinitis, sinusitis y enfermedades respiratorias.

Estudios epidemiológicos sobre el riesgo de cáncer entre los trabajadores de las industrias en que se utiliza el níquel arrojan, por lo general, resultados negativos, pero estudios más recientes ponen de manifiesto un riesgo de cáncer de pulmón ligeramente superior entre los trabajadores que participan en los procesos de soldadura, triturado y galvanizado, y en la fabricación de baterías. En efecto, suelen estar expuestos a polvo y humos que contienen mezclas de metales cancerígenos, como níquel y cromo o níquel y cadmio. Basándose en una evaluación de los estudios epidemiológicos, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). La exposición a sulfato de níquel y a las combinaciones de sulfuros y óxidos de níquel presentes en la industria del refinado del níquel son considerados como potenciales cancerígenos, aunque no existen pruebas concluyentes en humanos de la carcinogenicidad del níquel y sus aleaciones.

Cromo (Cr): Los compuestos con cromo en estado de oxidación Cr (+3) son considerablemente menos peligrosos que los compuestos de Cr (+6).

Los efectos nocivos de los compuestos de cromo se observan generalmente entre las personas que trabajan en lugares donde está presente el Cr (+6), especialmente durante su fabricación o utilización, y afectan principalmente a la piel y al aparato respiratorio. Los riesgos industriales típicos son: la inhalación de polvo y humos procedentes de la fabricación del dicromato a partir del mineral de cromita y de la fabricación de los cromatos de plomo y zinc; la inhalación de nieblas de ácido crómico durante el cromado o el revestimiento de superficies metálicas; y el contacto cutáneo con compuestos de Cr (+6) durante su fabricación o uso. La exposición a humos que contienen Cr (+6) también puede producirse durante la soldadura del acero inoxidable¹⁹⁴.

3.4.- Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las sales consideradas

Debido a los procesos industriales en los que se trabaja a elevada temperatura, el empleo de las sales fundidas es una forma económica y eficiente de obtener el vapor necesario mueva una turbina y obtener energía eléctrica. Como se explicó anteriormente, las sales fundidas industriales presentan una serie de impurezas como cloruros, percloratos y la propia humedad que van a ser los responsables de generar una serie de compuestos indeseables que van a conducir a la degradación de la sal y a la vez influyen

¹⁹⁴ Nordberg, G., Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad, ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO, Tomo 2, Capítulo 63, 2001.

de manera negativa sobre el material que se encuentra en contacto con ella.

Durante los ciclos térmicos se van a formar compuestos como NO_2 peligroso para la salud humana, así como otro tipo de óxidos de nitrógeno formadores de ácidos, así como volátiles que pueden provocar explosiones en contacto con diversos compuestos orgánicos.

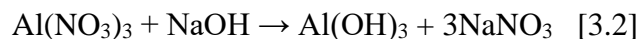
Las etapas que se tendrán en cuenta en el Análisis de Ciclo de Vida serán las siguientes:

- *Etapas de Extracción del NO_3* : Proceso mediante el cual se obtiene en forma de nitrina, aunque también se puede obtener de forma sintética.

- *Etapas de Obtención*: Mediante esta etapa, se obtiene el NaNO_3 mediante la neutralización de HNO_3 con Na_2CO_3 mediante la reacción:



Y también a partir de



En forma natural, el KNO_3 se encuentra en un mineral llamado nitro que suele estar combinado con la nitrina (NaNO_3) formando salitre.

La obtención de KNO_3 se realiza a partir del NaNO_3 y KCl consiguiendo la cristalización del KNO_3 al ser menos soluble. La reacción de síntesis a partir del HNO_3 se efectúa mediante la reacción:



- *Etapas de Uso*: En esta etapa, los productos finales son utilizados en la planta y permanece durante su vida útil.

- *Etapas de Reciclado*: Etapa en la que al final de la vida útil de la sal inorgánica, se purifica o deshecha.

Visto esto, mediante el ACV de las sales se comprobará la influencia en forma de diferentes impactos, que van a provocar, a lo largo de su ciclo de vida, estos compuestos.

3.4.1.- Análisis de Ciclo de Vida de la Sal Solar binaria

El Análisis de Ciclo de Vida desarrollado para la sal solar binaria se ha efectuado mediante el método ReCiPe, partiendo de los datos de inventario de las composiciones porcentuales de los diferentes compuestos que componen la sal y tomando como unidad funcional 1 kg. de sal. A partir de los datos de inventario seleccionado de la base de datos Ecoinvent se obtienen los efectos debidos a las emisiones y recursos que serán específicos para los resultados medioambientales de las diferentes categorías de impacto.

Los datos que se han tenido en cuenta figuran en el cuadro inferior:

Tipo de Sal Inorgánica	% NaNO ₃	% KNO ₃
Sal Solar Binaria	60	40

Los valores de categoría de impacto dependen de la base de datos Ecoinvent y obtendremos una tabla de caracterización mediante la cual se van a obtener para cada categoría de impacto sus respectivos valores que se muestran en la Tabla 3.5 en la parte inferior.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	401
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	1,0610 ⁻⁵
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,71
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	106
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,955
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,502
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	21,2
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	6,03
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	2,71
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,0416
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	384
Agotamiento de Metales	kg. Fe _{equiv}	22,9
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	61,7

Tabla 3.5: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Sal Solar Binaria
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

A partir de los datos de la Tabla 3.5 se obtuvo el gráfico de barras de Normalización que se muestra en la figura de la siguiente página, como Gráfico 3.7.

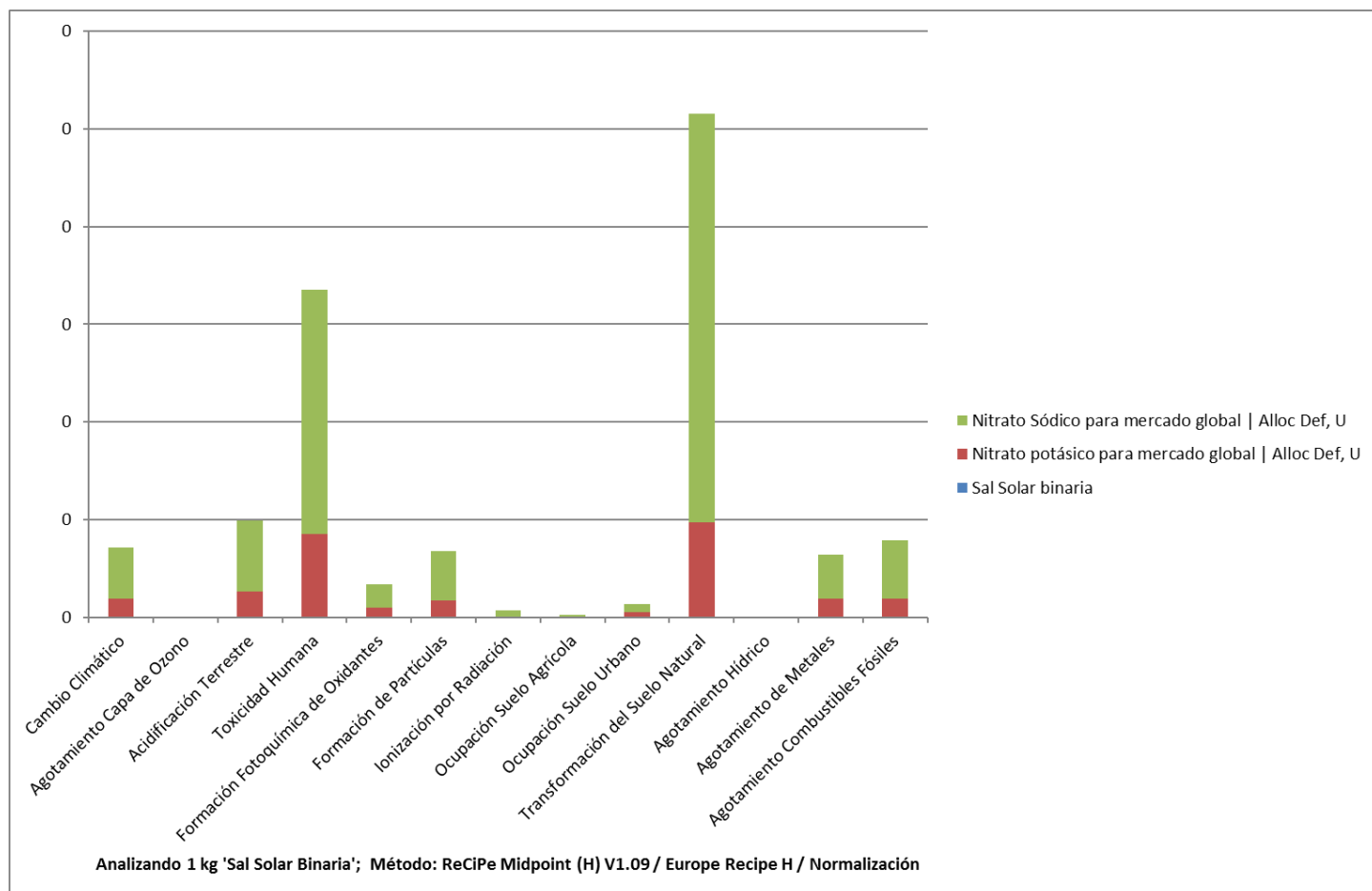


Gráfico 3.7: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de “Sal Solar Binaria” con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Si nos fijamos en el Gráfico 3.7, las categorías de impacto con mayor contribución corresponden a las categorías de Transformación del Suelo Natural que adquiere un valor de 0,0416 m² y Toxicidad Humana con 106 kg.1,4-DB_{equiv.} Otras categorías de impacto con representación, pero con valores no tan significativos como los dos anteriores, corresponden a la Acidificación del terreno, el Agotamiento de combustibles fósiles, el Cambio Climático, Formación de Partículas, Agotamiento de Metales y Formación Fotoquímica de Oxidantes.

Los valores numéricos de la contribución de cada uno de los componentes de la sal solar binaria para la categoría de impacto correspondiente a la Transformación del Suelo Natural se muestran en la Tabla 3.6 de la página siguiente y corresponden a:

$$\text{NaNO}_3: 0,2089 \quad \text{KNO}_3: 0,0488$$

Como puede observarse, se trata de los valores más elevados de todas las

categorías de impacto, para ambos componentes. Dentro de la categoría de Toxicidad Humana, el NaNO_3 adquiere un peso importante mediante un valor numérico elevado, 0,1249 y para el resto de las categorías comentadas, de los dos componentes, es el NaNO_3 el que aporta mayor carga medioambiental.

Categoría de impacto	KNO_3	NaNO_3
Cambio Climático	0,0095	0,0262
Agotamiento Capa Ozono	0,0001	0,0003
Acidificación Terrestre	0,013	0,0366
Toxicidad Humana	0,0428	0,1249
Formación Fotoquímica de Oxidantes	0,0049	0,0119
Formación de Partículas Sólidas	0,0086	0,0251
Ionización por Radiación	0,0005	0,0029
Uso de Suelo Agrícola	0,0004	0,001
Uso de Suelo Urbano	0,0027	0,004
Transformación del Suelo Natural	0,0488	0,2089
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0
Agotamiento de Metales	0,0094	0,0227
Agotamiento de Combustibles Fósiles	0,0098	0,0299

Tabla 3.6: Valores obtenidos en Normalización para los dos componentes de la Sal Solar Binaria

Fuente: Elaboración propia mediante SimaPro 8.0

El árbol de contribución que se obtiene para la Categoría de Impacto correspondiente a la Transformación del Suelo Natural se representa para un valor de corte del 15.8% y se muestra mediante el Gráfico 3.8 de la página siguiente con las subcategorías consideradas para ese corte.

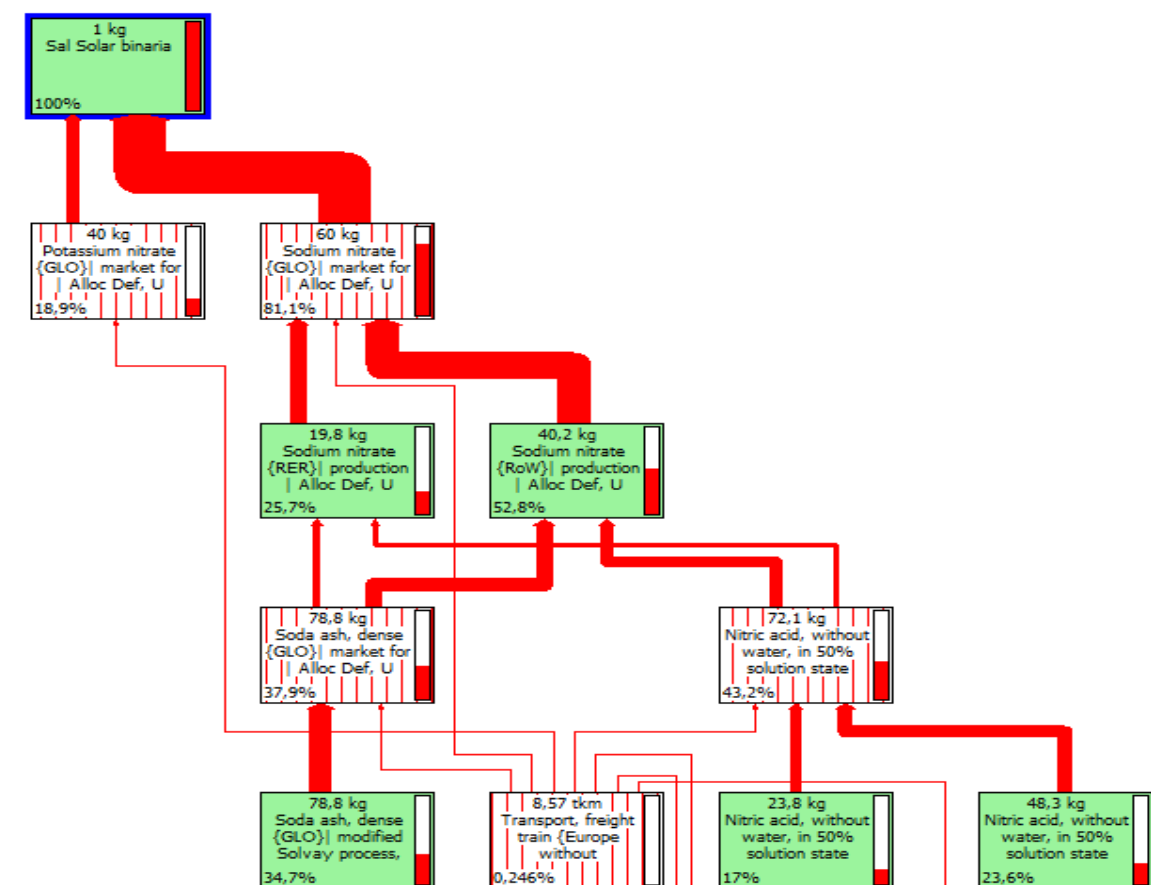


Gráfico 3.8: Árbol de contribución de la Categoría de Impacto Transformación Natural de la Tierra para la Sal Solar Binaria
Fuente: Elaboración propia mediante Sima pro 8

Los principales daños producidos por el uso del suelo que se consideran en cualquier método de evaluación de impacto son los producidos sobre el medio ambiente natural y sobre los recursos naturales; más concretamente, los producidos sobre la biodiversidad, el potencial de producción biótica (incluyendo la fertilidad del suelo y el valor de uso de la biodiversidad) y la calidad ecológica del terreno (incluyendo las funciones de soporte vital del terreno distintas de la producción biótica o de biomasa del mismo, ya sea como elemento del ciclo del agua, carbono y nutrientes, como filtro de contaminantes químicos o como hábitat de flora y fauna).

A partir del árbol de contribución para la categoría de Transformación del Suelo Natural, se observa que las mayores contribuciones, mediante los trazos gruesos, corresponden a la etapa del mercado del NaNO_3 con un porcentaje del 81,1%, este proceso está compuesto de varios subprocesos, en el árbol se ve que para tener NaNO_3 en el mercado, se ha producido el mismo en Europa (RER) y en el resto del mundo (RoW, por sus siglas en inglés, Rest of the world). Lo que indica ese nivel es que el NaNO_3 producido en el resto del mundo impacta más que el producido en Europa. La

contribución al impacto de NaNO_3 global es de un 52,8% en el caso del resto del mundo, frente al 25,7% de Europa. Lo que indica que la producción mundial de este compuesto es menos respetuosa con el medioambiente (en materia de Transformación Natural de la Tierra) que la europea. Es considerable el aporte de Na_2CO_3 en un 37,9% y el HNO_3 con el 43,2% para la síntesis del NaNO_3 .

Se observa que de todos los subprocessos implicados en la producción del NaNO_3 , el que presenta una mayor carga ambiental es el debido a la densificación de las cenizas de sosa mediante el proceso Solvay modificado aportando un 34,7%.

La incidencia del KNO_3 es muy inferior a la del NaNO_3 presentando una aportación del 18,9%.

El transporte de ambos componentes presenta una aportación prácticamente nula, 0,246%.

De todo esto se puede deducir, como se había comprobado en la Normalización, que la mayor carga medioambiental, es debida al NaNO_3 .

3.4.2.- Análisis de Ciclo de Vida de la Sal Solar Ternaria “Hitec”

Al igual que con la sal binaria, para el Análisis de Ciclo de Vida de esta sal, se ha utilizado el método ReCiPe, con la misma base de datos y unidad funcional tomando como datos iniciales los correspondientes a las composiciones porcentuales de los tres componentes de la sal solar según figuran en el siguiente cuadro.

Tipo de Sal Inorgánica	% NaNO_2	% NaNO_3	% KNO_3
Sal Solar Ternaria “Hitec”	40	7	53

La diferencia que se aprecia respecto a la sal binaria es la incorporación de un nuevo compuesto, el NaNO_2 y la reducción en la proporción de NaNO_3 . El porcentaje del compuesto KNO_3 se encuentra incrementado en un 13% con respecto al que contiene la sal binaria y por ello es previsible, si tenemos en cuenta el análisis anterior de la Sal Solar Binaria, que al incorporar mayor cantidad de K en forma de nitrato que Na, será un compuesto más respetuoso con el medio ambiente debido a la ausencia de gran parte de Na en su composición que como se vio era el más incidente sobre el impacto.

Los valores que se obtienen para cada categoría de impacto, a partir de la base de datos Ecoinvent 3 se muestran en la siguiente página mediante la Tabla 3.7:

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	291
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	$2,77 \cdot 10^{-5}$
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,48
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	98
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,867
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,47
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	24,7
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	5,4
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	2,73
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,0365
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	461
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	19
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	59,8

Tabla 3.7: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Sal Solar Ternaria “Hitec”
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.

Observando la tabla de Caracterización obtenida para la sal solar ternaria y comparando sus valores con los obtenidos para la sal binaria se aprecia una considerable disminución en casi todas las categorías de impacto excepto en la correspondiente a Radiación Ionizante, la Ocupación de Tierra Urbana y el agotamiento de Recursos Hídricos, que son ligeramente superiores a los de la sal binaria.

La gráfica de Normalización que se obtiene a partir de los valores de caracterización de la Tabla 3.7 presenta el siguiente aspecto.

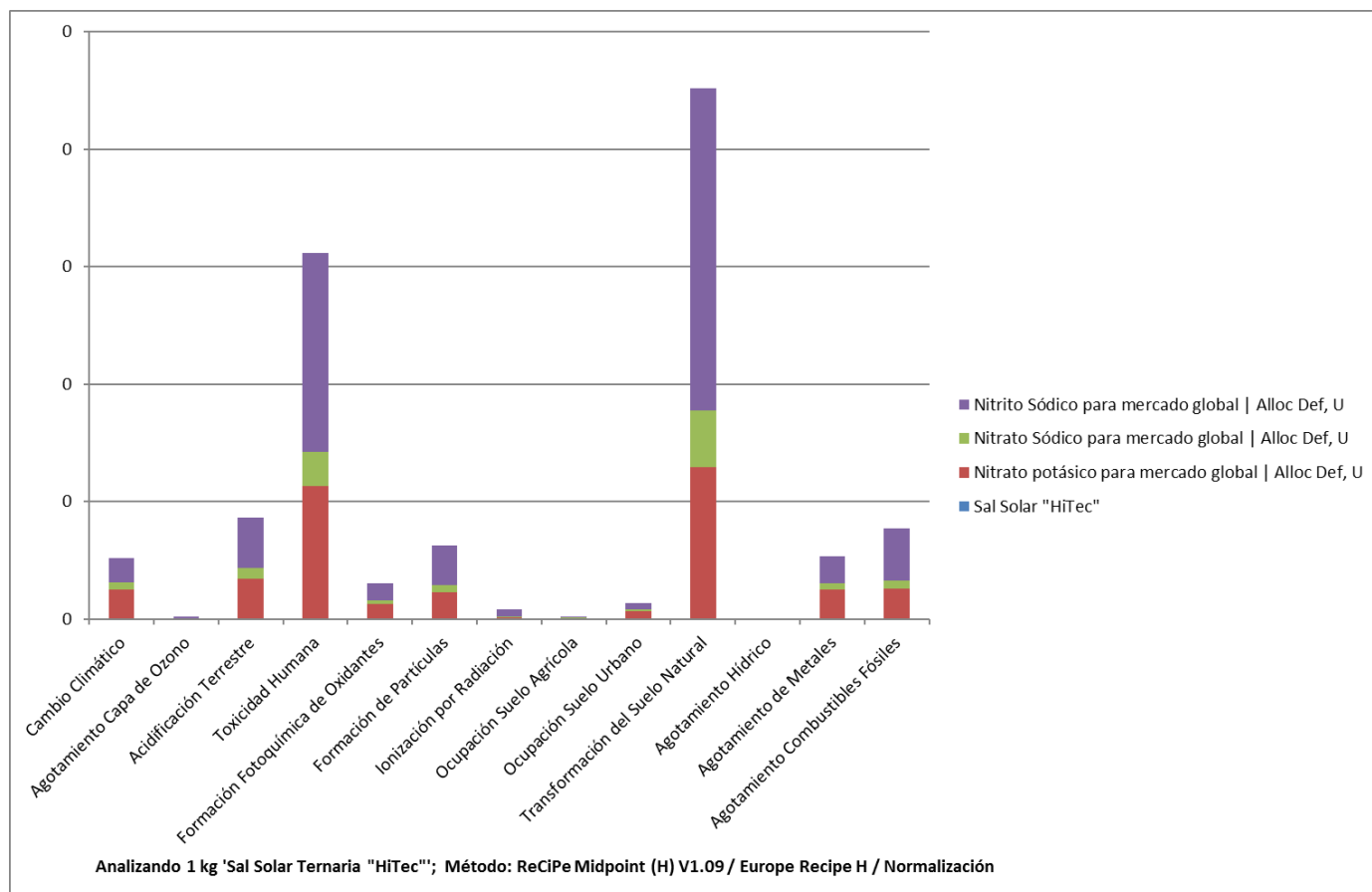


Gráfico 3.9: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de “sal solar ternaria Hitec” con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Mediante el Gráfico 3.9 de Normalización se comprueba que las categorías de impacto con mayor contribución son las debidas a Transformación Natural de la Tierra que presentaba un valor en la tabla de caracterización de $0,0365 \text{ m}^2$ y Toxicidad Humana con un valor de $98 \text{ kg.1,4-DB}_{\text{equiv.}}$

Otras categorías de impacto con representación, pero con valores no tan significativos como los dos anteriores, corresponden a la Acidificación, el Agotamiento de combustibles fósiles, el Cambio Climático, Formación de Partículas, Agotamiento de Metales y Formación Fotoquímica de Oxidantes.

Los valores numéricos de la contribución de cada uno de los componentes de la sal solar ternaria para la categoría de impacto correspondiente a la Transformación Natural del Terreno se muestran en la Tabla 3.8 aportando los siguientes valores numéricos: NaNO_3 : 0,0244 KNO_3 : 0,0646 NaNO_2 : 0,1367

Categoría de impacto	KNO ₃	NaNO ₃	NaNO ₂
Cambio Climático	0,0126	0,003	0,0103
Agotamiento Capa Ozono	0,0002	$4,04 \cdot 10^{-5}$	0,001
Acidificación Terrestre	0,0173	0,0043	0,0216
Toxicidad Humana	0,0568	0,0146	0,0845
Formación Fotoquímica de Oxidantes	0,0065	0,0014	0,0074
Formación de Partículas Sólidas	0,0114	0,0029	0,0172
Ionización por Radiación	0,0007	0,0003	0,0029
Uso de Suelo Agrícola	0,0005	0,0001	0,0006
Uso de Suelo Urbano	0,0036	0,0005	0,0027
Transformación del Suelo Natural	0,0646	0,0244	0,1367
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0	0
Agotamiento de Metales	0,0124	0,0027	0,0115
Agotamiento de Combustibles Fósiles	0,013	0,0035	0,022

Tabla 3.8: Valores obtenidos en Normalización para los tres componentes de la Sal Solar Ternaria "Hitec" Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

La segunda categoría de impacto que más influye es el correspondiente al de Toxicidad Humana siendo el NaNO₂ el componente de mayor incidencia con un valor numérico correspondiente a 0,0485, seguido del KNO₃ con 0,0568. El NaNO₃ es el menos influyente debido, principalmente, al pequeño porcentaje que aporta en la composición de la sal.

El árbol de contribución obtenido para la categoría de impacto más influyente, la de Transformación Natural del Terreno, se representa para un valor de corte del 9,5% y se representa mediante el Gráfico 3.10 de la página siguiente con las subcategorías correspondientes para ese corte y que son las más influyentes en el proceso.

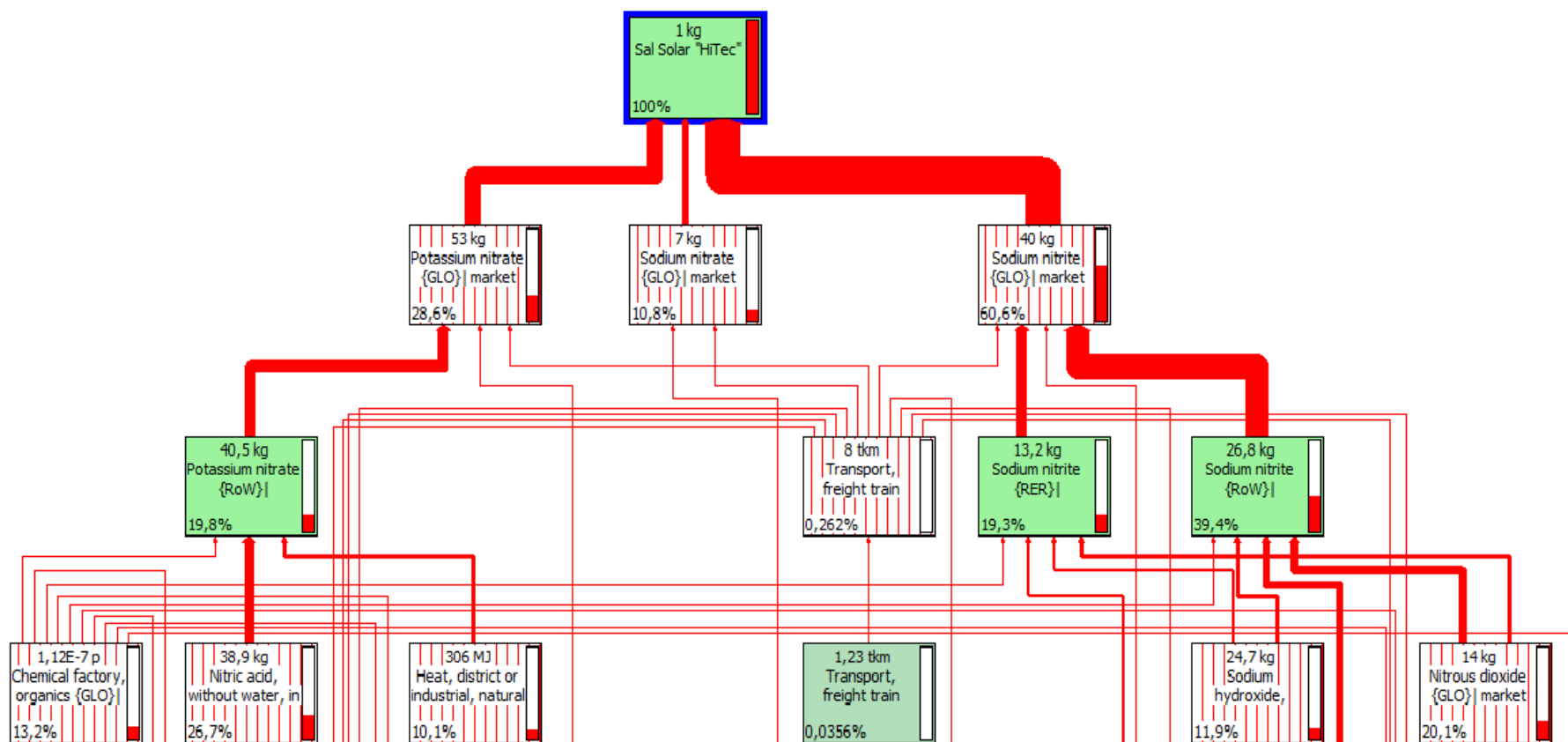


Gráfico 3.10: Árbol de contribución de la Categoría de Impacto Transformación Natural de la Tierra para la Sal Solar Ternaria "Hitec"
Fuente: Elaboración propia mediante Sima pro 8

Como puede observarse, la mayor contribución porcentual es debida al NaNO_2 con un valor del 60,6% seguida del KNO_3 con un 28,6% y por último el NaNO_3 con el 10,8%, debidas principalmente a la influencia del mercado global de los compuestos.

Dentro de los subprocesos del NaNO_2 , la correspondiente al mercado mundial (fuera de la Unión Europea) aporta un 39,4% y para el europeo el 19,3%. De las subcategorías dependientes de las del mercado mundial para el NaNO_2 , las principales aportaciones al impacto corresponden a la subcategoría del mercado del NO_2 con un 20,1% y la del NaOH con un 11,9%.

Para la rama del árbol correspondiente al KNO_3 , la principal aportación se debe al mercado mundial que arroja un valor porcentual del 19,8% teniendo como aportaciones más incidentes las del HNO_3 concentrado como compuesto principal para la síntesis del KNO_3 con una carga medioambiental del 26,7% y por otro lado la carga correspondiente al proceso energético industrial con un valor del 10,1% y el aportado por el proceso de producción en la industria química con el 13,2%.

Al igual que sucedía con la Sal Solar Binaria, el transporte tiene una incidencia muy pequeña en relación al resto de subprocesos implicados en el árbol de contribución.

Como conclusión para este gráfico, se observa que la mayor carga medioambiental para la Sal Solar Ternaria “Hitec”, es debida al NaNO_2 debido, como ocurría con la Sal Solar Binaria, a los diferentes procesos y mercados implicados en la obtención del Na.

La explotación minera constituye un uso intensivo y local de la tierra que es de corta duración; puede haber cierto grado de conflicto con los usos existentes no mineros. En las áreas remotas, se pueden atender a estas actividades desde el aire, obviando la necesidad de construir caminos de acceso y sufrir esa intrusión. Las minas superficiales, plantas de procesamiento, lixiviación de las pilas de desechos, operaciones in situ, y las actividades de superficie de las minas subterráneas, ocupan totalmente los sitios y excluyen los otros usos. En el caso de las minas subterráneas, el uso de la superficie encima de éstas depende de la magnitud del riesgo de hundimiento (que puede ser insignificante o seguro), y de la geología, profundidad del mineral y método de extracción. La posibilidad de utilizar la tierra después de que se terminen los trabajos de extracción dependerá del tipo, grado y éxito de la producción.



DEGRADACIÓN DE MATERIALES Y COMPUESTOS POR EFECTO DE ALTA TEMPERATURA

4. DEGRADACIÓN DE MATERIALES Y COMPUESTOS POR EFECTO DE ALTA TEMPERATURA

Como se ha explicado anteriormente, el funcionamiento en continuo de una CSP con tecnología de receptor central de torre, requiere alcanzar y mantener un rango de temperaturas que permita que el fluido térmico, sales fundidas, que actúan, a la vez como almacenador, permanezca en estado fundido para permitir la recirculación del mismo por todo el circuito.

El rango de temperatura de trabajo se sitúa entre 293°C y 565°C, la mínima para evitar la solidificación de las sales y la máxima para evitar su descomposición en el caso de ser superada. Al tratarse de fluidos agresivos a elevadas temperaturas, van a surgir fenómenos de corrosión de los materiales, aceros en este caso, que se encuentran en contacto con las sales de tal forma que la selección de materiales para los distintos componentes de la planta, será un factor determinante.

Los principales problemas ocasionados por fenómenos de corrosión en algunas centrales estudiadas, fueron ocasionados por el contacto de los materiales con las sales fundidas, deficientes aislamientos y fugas en las juntas. En determinados casos, un control de temperatura inadecuado ocasionó fallos en el equipo debidos a la congelación y descongelación de las sales en los ciclos de trabajo.

La corrosión a elevada temperatura es un fenómeno que no precisa la presencia de un electrolito siendo la oxidación el proceso de degradación, más frecuente en ambientes industriales¹⁹⁵. Las aleaciones en los aceros dependen de la reacción de oxidación que le permita originar una capa protectora o de pasivación, que infiera resistencia a los ataques tales como la sulfuración, carburización y otras formas sobre las que también influyen las altas temperaturas y que se expondrán más adelante.

El primer paso que aparece en la reacción entre el metal y O₂ supone la adsorción de gas sobre la superficie metálica. Este O₂ adsorbido se disuelve en el metal y se incorpora como núcleos de óxido separados o como una capa continua. El producto de reacción óxido-metal separa los dos reactivos de tal manera que para que continúe la propagación de la reacción, uno o ambos reactivos han de penetrar en la capa de óxido

¹⁹⁵ Roberge P.R. “*Handbook of Corrosion Engineering*” McGraw-Hill. 2ªEd., 2012.

mediante difusión en estado sólido y esto puede suceder de dos formas, bien el O_2 se incorpora a través de la capa formada por óxido-metal y reaccionar allí, bien sea el metal el que es transportado a través de la capa formada, hacia la interfase óxido metálico-gas y reaccionando allí¹⁹⁶.

Para el caso en que las capas de óxidos sean compactas, la difusión a través de ella es debida al gradiente del potencial químico y para capas más delgadas, esta difusión, se debe a los campos eléctricos. Si las capas de óxidos formadas son porosas, la difusión en estado sólido es limitada y puede quedar restringida a los límites de fase o que el transporte se realice a través de la difusión del gas. A temperaturas elevadas, las capas de óxido pueden ser líquidas y volátiles¹⁹⁷.

Posteriormente a que el O_2 ha sido adsorbido por la superficie, aparecen núcleos de óxido aislados en puntos aleatorios de la superficie del metal, pudiendo tratarse de impurezas atómicas o en imperfecciones superficiales. El crecimiento cristalino individual de estos núcleos sobre la superficie, puede progresar hasta que lleguen a conectar unos con otros quedando toda la superficie recubierta por óxido que actuará como barrera para la difusión¹⁹⁸.

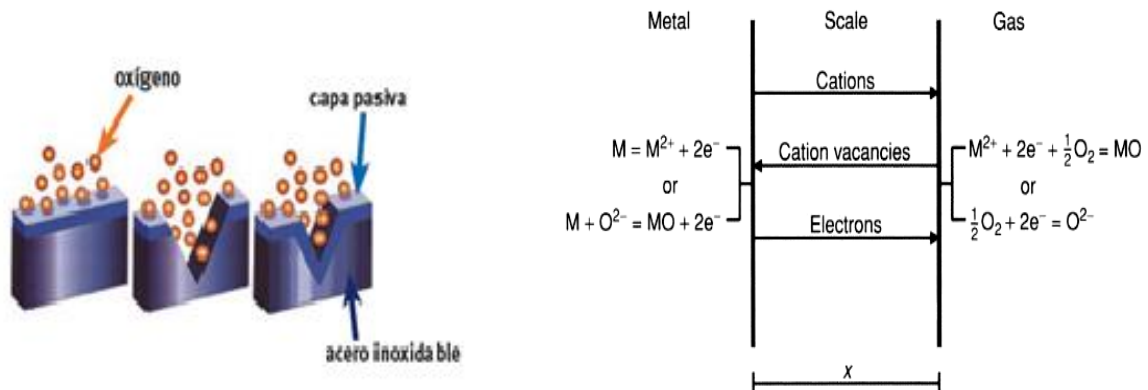


Figura 4.1: Detalle del efecto del O_2 sobre un acero y formación de capa de pasivación.

Fuente: Acinesgon y Birks N., G.H. Meier and F.S. Pettit.

Los mecanismos de transporte a través de la capa de óxido ocurren de tal forma que como la capa de óxido formada se encuentra limitada por un lado por el metal y por otro por el gas, para que pueda existir transporte a través de ella y pueda existir oxidación,

¹⁹⁶ Birks N., Meier G.H., and Pettit F.S., "Introduction to The High-Temperature Oxidation of Metals". 2nd ed., New York, Cambridge University Pres, 2006.

¹⁹⁷ Kofstad P., "High-Temperature Oxidation of Metals", 1966.

¹⁹⁸ West J.M., "Basic Corrosion and Oxidation". 2ª edic., Chichester: Ellis Horwood Limited, 1986.

el mecanismo de transporte mediante difusión de los reactivos en estado sólido.

Este tipo de difusión de estado sólido en la capa oxidada, sólo se presenta si existen defectos en la estructura de la capa de óxido siendo necesarios defectos puntuales como pueden ser vacantes, átomos intersticiales y átomos desplazados.

La etapa de crecimiento de la capa protectora se da por la difusión de los diferentes cationes y aniones. La difusión de los primeros provoca la formación de óxido en la interfase óxido-gas y la de los aniones conduce al crecimiento de la capa de óxido en la interfase metal-óxido.

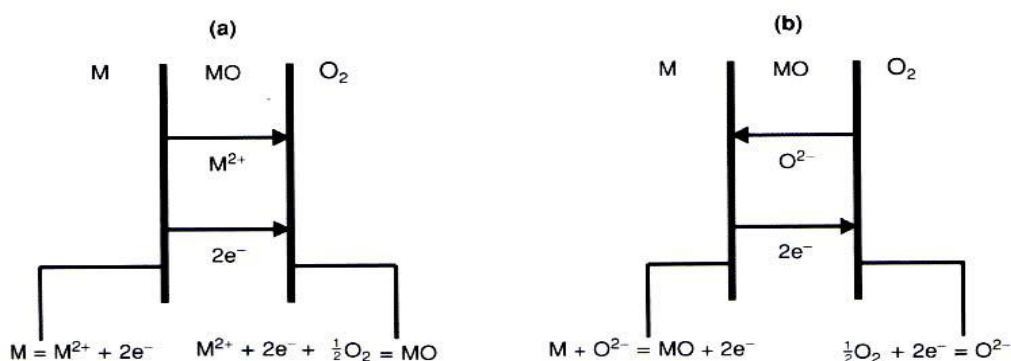


Figura 4.2: Esquema de los mecanismos de oxidación a elevada temperatura en la interfase metálica y la ruta de transporte de iones.
Fuente: Birks N., Meier G.H. and Pettit F.S. Cambridge University Press.

La estequiometría de cationes y aniones en la capa de óxido no es equivalente presentando exceso de unos y defecto de otros o bien defecto de O₂.

El grado de oxidación que aporta determinada reacción química, es una condición de vital importancia para pronosticar la vida de determinado material en presencia de medios agresivos y por ello, existen estudios del mecanismo cinético de este tipo de reacciones y que se basan en la cantidad de material degradado o bien cantidad de óxido generado, en determinado espacio de tiempo. Para la determinación de estos mecanismos, existen una serie de leyes cinéticas bien diferenciadas, definidas para casos ideales mediante su representación teniendo en cuenta el cambio de masa frente al tiempo y son principalmente tres tipos:

Ley Lineal:

La expresión cinética que representa determinado proceso que se ajusta a ella, viene expresada mediante la siguiente ecuación:

$$m = k_1 \cdot t \quad [\text{Ecuación 14}]$$

m: variación en la masa del material.

t: tiempo definido.

k_1 : constante lineal.

Para esta situación, el grado de corrosión es independiente del tiempo y se trata de una situación característica de una reacción superficial o para una difusión de elementos en fase gaseosa, es decir, se trata de un proceso en el que la capa superficial se desprende por la presencia de tensiones o por la existencia de una capa porosa no protectora de tal manera que, tras una larga exposición a elevada temperatura, el material se destruye.

Ley Parabólica:

La expresión cinética que representa el proceso de degradación que se ajusta a esta ley, viene expresada mediante la siguiente ecuación:

$$m^2 = k_2 \cdot t \quad [\text{Ecuación 15}]$$

m: variación en la masa del material.

t: tiempo definido.

k_2 : constante parabólica.

Se trata de la más característica de la oxidación de materiales en presencia de alta temperatura y dicho proceso de oxidación está controlado por la difusión de las diferentes especies hacia la capa de óxido formada¹⁹⁹. El efecto de este tipo de oxidación es el aumento del espesor de la capa protectora de óxido, con el aumento en el tiempo, evitando la difusión de especies a través de ella, y, por tanto, disminuyendo la velocidad de oxidación.

¹⁹⁹ Uhlig H.H., “Initial oxidation rate of metals and the logarithmic equation”. Acta metallography, N°4, pág.541-554, 1956.

Para la mayoría de los materiales metálicos y aleaciones especiales utilizadas en procesos con elevada temperatura, se llega a este tipo de ley, pasado un período transitorio en el que se generan cinéticas más rápidas con diferentes grados de oxidación²⁰⁰.

Ley Logarítmica:

Este tipo de ley se da para los materiales en los que se genera una capa muy delgada (inferior a 100 nm.) a bajas temperaturas, 300°C-400°C. Inicialmente, la generación de la capa, es rápida y sigue un grado de corrosión despreciable debido a que la cinética de oxidación está controlada por fenómenos de transporte cercanos a la capa de óxido²⁰¹.

La expresión que rige esta ley viene representada mediante la ecuación:

$$m = k_3 \cdot \log (at + 1) \quad [\text{Ecuación 16}]$$

m: variación en la masa del material.

t: tiempo definido.

k₃: constante parabólica.

a: constante

La representación gráfica comparativa de las tres leyes, se muestra en el gráfico 12²⁰².

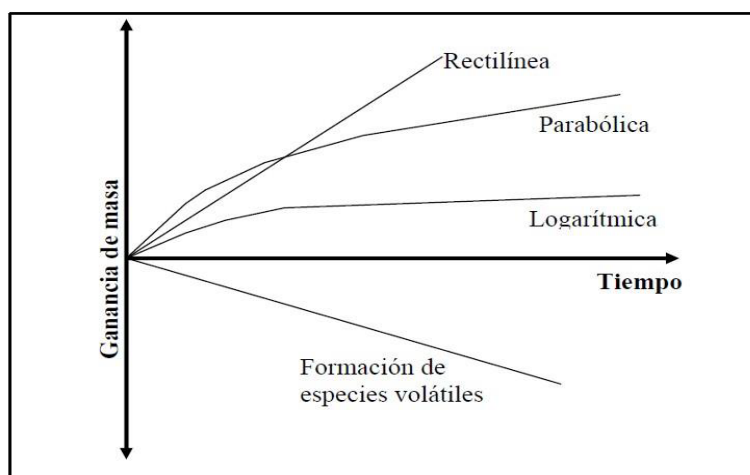


Gráfico 4.1: Representación comparativa de las leyes cinéticas de oxidación.

²⁰⁰ Pieraggi B.; "Oxidation of Metals", Vol. 27, N° 3 y 4 pág.177-185, 1987.

²⁰¹ Haycock E.W., "Transitions from Parabolic to Linear Kinetics in Scaling of Metals". Electrochemical society, N°106, pág.771-775, 1959.

²⁰² Brady G.S., Clauser H.R., Vaccari J.A., Materials Handbook, 15th ed, McGraw-Hill, New York, 2002.

La degradación de los aceros presentes en los diferentes componentes de las CSP de receptor central de torre considerados, se va a dar mediante las cinéticas parabólica y logarítmica y principalmente la primera, controlada por la difusión de especies siendo la teoría más aceptada la enunciada por Wagner²⁰³ y expone que la oxidación de determinado metal, M, a través de un oxidante X en fase gas, da lugar a la formación de diferentes especies de M y X. La velocidad de crecimiento de la capa de óxido se origina mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k'}{x} \quad [\text{Ecuación 17}]$$

x: Capa de óxido.

t: Tiempo expresado en s.

k': Constante parabólica expresada en cm²/s.

El modelo de Wagner presenta las siguientes consideraciones:

- Capa de óxido, compacta y adherente
- La etapa limitante del proceso consiste en la migración de iones y electrones a través del óxido.
- Equilibrio termodinámico en interfases metal/óxido y óxido/gas.
- Regularidad estequiométrica del óxido.
- Equilibrio local en toda la capa de óxido.
- Capa de óxido más gruesa que el espesor de las zonas en las que hay transporte de carga.
- Solubilidad nula de O₂ en el metal.

A continuación, se pasa a describir los principales procesos de corrosión a elevada temperatura y que se pueden agrupar en:

- *Oxidación*: Se trata de la reacción de mayor importancia que sucede a alta temperatura y se trata de un proceso que, en sí mismo, no siempre es indeseable porque la mayor parte de las aleaciones resistentes a la corrosión son dependientes de la formación de una capa protectora de óxido que le hace resistente al proceso. En el caso de los aceros, es el Cr₂O₃ el producto más corriente en la formación de esa capa protectora.

²⁰³ Wagner C., “Contributions to the Theory of the Tarnishing Process. Physical and Chemical”, pág.25-41, 1933.

Para determinados materiales, la temperatura de trabajo es una condición decisiva en la evaluación de la capa de oxidación de tal forma que un incremento de temperatura supone un aumento en el índice de oxidación. Por otro lado, los procesos en los que se dan ciclos térmicos provocan agrietamientos en las capas de óxidos protectores lo que conduce a tener que trabajar a temperaturas más bajas para ese proceso.

La formación de las capas de óxidos en los procesos a elevada temperatura conduce a la generación de tensiones que van a afectar a las características protectoras de ellas siendo de gran importancia las oscilaciones de temperatura que puedan suceder durante los procesos dándose recristalizaciones en metal y óxido durante la etapa de crecimiento de la capa y que generará tensiones de capa que pueden producir daños a la misma en los ciclos tensión/distensión por las oscilaciones térmicas perdiendo la capacidad de protección frente a la oxidación. Dentro de las tensiones que pueden surgir en las capas de óxido durante los diferentes procesos a elevada temperatura, se pueden distinguir los siguientes:

- *Tensiones de crecimiento*: Son tensiones que presentan los óxidos policristalinos, por todo el límite de grano y debido a la orientación preferencial en la dirección de crecimiento o bien por la desviación estequiométrica de los óxidos al darse la oxidación preferente de unos óxidos sobre otros. También pueden surgir estas tensiones por la difusión del oxígeno en el material y produciendo apretamiento en los átomos metálicos.
- *Tensiones de transformación*: Pueden surgir por la oxidación preferente de uno de los componentes de la aleación, lo que conlleva a la alteración en la composición de la aleación y la transformación cristalina que conlleva un cambio de volumen que origina tensiones entre metal y óxido.
- *Tensiones de térmicas*: Sucede durante la disminución de la temperatura de reacción hasta la temperatura ambiente, en los óxidos formados sobre la superficie del metal. En la mayoría de los casos, la dilatación térmica del óxido es inferior a la del metal y al producirse el enfriamiento, ocurren desprendimiento de óxidos desde el metal provocando vacantes que genera tensiones de capa.

La rotura continua de las capas de óxido acelera la cinética del proceso, que sigue la ley parabólica, provocando un ataque agresivo del gas oxidante sobre el metal al quedar, en ese momento, sin protección y generándose una nueva capa protectora y la

recuperación del comportamiento parabólico.

Para el caso de algunos aceros inoxidable, como es el caso del considerado AISI 347H y los austeníticos en general, el comportamiento es opuesto al supuesto anterior y es que el incremento del contenido en Cr permite trabajar a temperaturas más elevadas mejorando la resistencia al fenómeno de corrosión. Otros aleantes que ayudan a mejorar la resistencia a la corrosión son el Al, Si, Ni y otros correspondientes al grupo de elementos de transición como pueden ser el Y y Ce. Así para, para temperaturas superiores a 1200°C, la resistencia a la oxidación de las aleaciones, va a depender de la formación de capas protectoras de Al_2O_3 y el incremento de la cantidad de Ni en los aceros austeníticos provocará un gran efecto sinérgico beneficioso con el Cr.

El efecto de los aleantes resulta pues, beneficioso para este proceso, pero se ha de tener precaución en la adición de ellos para evitar la formación de diferentes fases frágiles que disminuirían las propiedades mecánicas de los materiales. Para evitar estos problemas, la solución propuesta es el uso de aleaciones superficiales en las que se induce una capa superficial altamente aleada y resistente a la oxidación, con un sustrato con composición convencional.

Diferentes ensayos, han demostrado que un gran número de aleaciones presentan una dependencia con el tiempo, de tipo parabólico. Mediante ensayos en los que se someten muestras a una temperatura superior a 900°C al aire, durante 1000 horas, al eliminar la capa formada y exponer la aleación al gas, la cinética de la reacción de oxidación es muy rápida.

La mayoría de las aleaciones son propensas a incrementar las tasas de penetración con el aumento de la temperatura independientemente de la concentración de O_2 .

- *Sulfuración*: Es otro mecanismo de corrosión que se encuentra relacionado con la presencia de contaminantes por compuestos de S y es un proceso influenciado por la actividad del O_2 de tal forma que cuando disminuye su concentración, el medio se vuelve sulfidizante y las reacciones de corrosión dependen de la actividad del sulfuro. Un examen microscópico de las aleaciones afectadas por este proceso, presentan un frente penetrante debido a ello y pudiendo darse una penetración por picadura. La sulfuración puede existir en ambientes gaseosos y por la presencia de depósitos salinos en la superficie del acero.

Existen tres categorías para la sulfuración en ambientes gaseosos:

- Mezclas $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ o vapores de sulfuro en una atmósfera reductora.
- Atmósferas con mezclas de gases moderadamente reductores que contienen mezcla de H_2 , H_2O , CO_2 , CO y H_2S .
- Atmósferas con alto contenido en SO_2 existentes en los altos hornos, en los que el S combustiona con el aire y se genera H_2SO_4 .

En la primera categoría, los sulfuros son termodinámicamente más estables que el Cr. La mezcla $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ es altamente corrosiva a temperaturas superiores a 260°C .

La sulfuración de aleaciones con elevado contenido en Ni, como es el caso de la HRSA INCONEL 617, es rápida generando tasas de corrosión superiores a 2.5 mm./año de tal manera que para temperaturas que superen los 600°C se forman compuestos de sulfuro de níquel y Ni metálico. Para evitar este tipo de corrosión, son recomendables las aleaciones con alto contenido en Ni y Cr, aunque las aleaciones más resistentes a este proceso de sulfuración son las que incorporan elevadas concentraciones de Co.

- *Carburización*: Es otro proceso ligado a la concentración de O_2 en el medio de tal forma que, a menor cantidad de este, el medio se vuelve más carburizante. Se puede originar cuando las aleaciones se encuentran expuestas a atmósferas ricas en CO , CH_4 , $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ y algún otro hidrocarburo, a elevadas temperaturas.

En este proceso, el C se combina con el Cr u otros elementos presentes en la aleación como pueden ser el Nb, W, Ti o Mo formando carburos internos con estructuras y composiciones complejas precipitando en los límites de grano o en su interior de tal manera que provocan que el material se vuelva quebradizo a temperaturas cercanas a los 500°C . La aparición de carburos de cromo, estables, reduce la resistencia a la oxidación.

El daño debido a la carburación está íntimamente ligado al aumento de las temperaturas en atmósferas mencionadas anteriormente (metano, monóxido de carbono etc.) y generalmente, los problemas debidos al proceso de carburación, suceden a temperaturas superiores a 815°C por la debilidad de la cinética de formación de carburos a esas temperaturas.

- *Nitridación*: Al igual que en la carburización, se trata de un proceso ligado a la cantidad de O_2 y sucede en los aceros al carbono y los inoxidables expuestos a atmósferas con NH_3 o N_2 en condiciones reductoras y elevadas temperaturas y por la combinación del Cr y otros elementos con el N_2 , formando nitruros frágiles.

Las aleaciones con elevado contenido en Ni suelen ser más resistentes cuando se combinan con Co.

- *Presencia de halógenos en estado gaseoso*: En esta situación, la presencia de O_2 influye de forma diferente a la expuesta en los casos anteriores. Los cloruros y fluoruros contribuyen a la corrosión a elevada temperatura, entorpeciendo en la formación de capas de óxidos protectores o bien descomponiendo las ya formadas y generando productos de corrosión volátiles no protectores, mientras que las adiciones de Al son beneficiosas por la formación de capas protectoras a altas temperaturas.

Los cloruros presentan una elevada volatilidad y puntos de fusión bajos por lo que no favorecen la formación de la barrera de difusión sobre el sustrato de los materiales. Un ejemplo de esta situación es el que presentan las aleaciones con altos contenidos en W y Mo que tienen altas cinéticas de corrosión en estos medios por la presencia de oxiclорuros volátiles.

En atmósferas de Cl_2 a elevada temperatura, las adiciones de Cr y Ni, en las aleaciones, aportan una serie de beneficios en cuanto a la minimización de este proceso y, por tanto, los aceros inoxidables son más resistentes que los aceros poco aleados y dentro de los aceros inoxidables, los austeníticos, presentan mejores propiedades que los ferríticos a igual contenido en Cr. Las aleaciones con alto contenido en Ni presentan mejor comportamiento frente a los cloruros, pero no frente a fluoruros porque estos son más solubles en Ni. Cuando se da la situación en que la atmósfera presenta cloruros y O_2 conjuntamente, se presenta una situación de competencia entre la formación de óxidos estables y diferentes especies de cloruros volátiles y por ello, la tasa de degradación puede variar entre una ley de cinética parabólica, lineal o una mezcla de ambas.

- *Depósitos salinos y cenizas*: En procesos industriales a elevada temperatura, las superficies de los materiales sometidos a degradación, se forman depósitos superficiales de cenizas o sales que reaccionan con las capas de óxidos protectores y llevan a su descomposición con posterior corrosión. Este tipo de corrosión a elevada temperatura

sucede a partir de los 800°C, aunque se han dado casos a menor temperatura.

- *Sales fundidas*: Este tipo de corrosión a elevada temperatura es aplicable a aleaciones que retienen la sal fundida y presenta una elevada dependencia con la actividad del O₂ siendo el ataque más severo el debido a la interfase aire/sal que es la zona en la que el O₂ presenta mayor actividad. Las principales situaciones que hacen que las sales fundidas sean extremadamente corrosivas son los siguientes:

- En contacto con la aleación desestabilizan las capas de óxido protector.
- Temperaturas elevadas de trabajo.
- Evitan la formación de capas protectora debido a su elevada solubilidad.
- Facilidad de reacción química entre material contaminante y sal.
- Presencia de iones de metales nobles.

4.1.- Degradación de las aleaciones consideradas por efecto de las sales fundidas

Mediante revisión bibliográfica se aprecia diversa documentación sobre el comportamiento de diferentes materiales, utilizados en la CSP Solar Dos, en presencia de sales fundidas de nitratos, utilizadas como HTF y como compuesto para almacenamiento térmico. En ellos se aprecia el uso de los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 304H para los conductos que transportan la sal caliente (565°C) procedente del receptor, apreciándose agrietamiento de los mismos debido al fenómeno de corrosión bajo tensión²⁰⁴.

Este mismo fenómeno, puede darse también para los aceros del tipo AISI 316 para los siguientes casos:

- Aparición de tensiones residuales cuando se realizó la laminación y durante el proceso de soldadura.
- Contaminación de la sal fundida de nitrato por la presencia de cloruros.
- Deficiencia de Cr por su disolución en la sal fundida debido a la presencia de impurezas en la sal fundida de calidad industrial con presencia de cloruros y percloratos que tienen

²⁰⁴ Kelly B. “Lessons Learned, Project History and Operating Experience of the Solar Two Project”. SAND2000-2598, 2000.

un potente carácter corrosivo²⁰⁵ así como la existencia de trazas de humedad.

El mismo Kelly, B. considera como materiales resistentes al agrietamiento por corrosión los inoxidables AISI 321 y AISI 347, las superaleaciones del tipo INCONEL y aceros ferríticos con elevado contenido en Cr, que serían una buena opción para las tuberías que transportan la sal de nitrato caliente.

El uso de acero al carbono para los conductos que transportan la sal de nitrato fría, conducían a la degradación del mismo por sobrecalentamiento.

Ensayos realizados para estos conductos con aleaciones ricas en Ni, del tipo INCONEL 718 y 625 presentaron datos de mínima corrosión a temperaturas cercanas a los 600°C. Debido a las impurezas de cloro existentes en las sales, se observó gran pérdida de metal a una temperatura de 600°C durante de 5000 horas de pruebas siendo mayor la pérdida de masa en el INCONEL 717 que en el 625 observando capas de NiO muy adherentes²⁰⁶ y a 650°C durante 2500 horas pérdidas de masa superiores a las anteriores.

El uso de acero AISI 316SS en los tubos del receptor durante 1500 horas de funcionamiento en presencia de sales fundidas presentó un grado de corrosión mínimo por formación de escamas de óxidos inferiores a 10 micras²⁰⁷.

A consecuencia de los resultados observados en la experimentación de la CSP Solar Two y estudios aportados por los diferentes autores se puede concluir que la presencia de diferentes impurezas en las sales de nitratos, como son el agua, percloratos y cloruros tienen una gran influencia sobre la resistencia a la corrosión en la mayoría de las aleaciones utilizadas para estos fines, siendo conveniente el análisis previo de las sales de nitrato para la determinación del contenido en ellos. El uso de aceros suaves es adecuado a temperaturas inferiores a 300°C y el uso de aceros con alto contenido en Cr, está indicado para temperaturas cercanas a los 570°C. El uso de aleaciones con alto contenido en Ni, del tipo INCONEL son resistentes a la corrosión hasta temperaturas cercanas a los 650°C.

²⁰⁵ Kearney D., Kelly B., Herrman U., Cable R., Pacheco J., Mahoney R., Price H., Blake D., Nava P. and Potrovitza N. "Engineering Aspects of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Trough Solar Field" Energy N°29, pág.861-870, 2004.

²⁰⁶ Goods S.H, Bradshaw R.W. "Corrosion of Stainless Steels and Carbon Steel by Molten Mixtures of Commercial Nitrate Salts". Journal of Materials Engineering and Performance N°13(1) pág.77-87, 2004.

²⁰⁷ Pacheco J.E. *Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project*. SAND2002-0120, 2002.

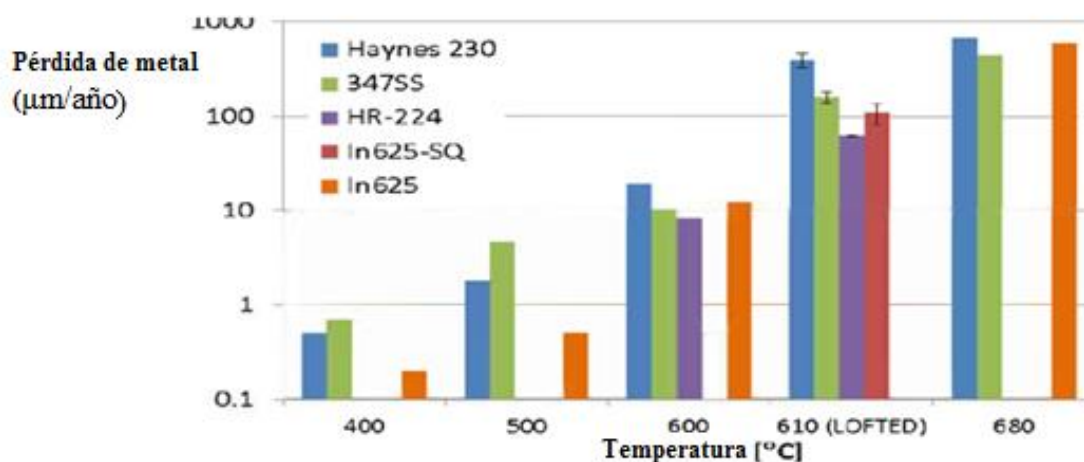


Gráfico 4.2: Efecto de la temperatura sobre diferentes aleaciones en presencia de sales fundidas.
Fuente: Bruce Kelly *Baseload Nitrate Salt Central Receiver Power Plant Design*
Abengoa Solar LLC DE-EE0003596

4.2.- Degradación de las sales fundidas

Es fundamental que las mezclas de sales fundidas de bajo punto de fusión presenten una buena estabilidad a elevada temperatura para este tipo de tecnología. El aspecto fundamental del uso de sales de nitratos para el almacenamiento térmico se basa en el equilibrio químico y las reacciones por las que las sales fundidas se encuentran en contacto con el CO₂ atmosférico. Diferentes estudios han contemplado las diferentes mezclas de sales a elevadas temperaturas observando su estabilidad hasta temperaturas cercanas a los 600°C.

Para el caso de la Sal Solar Binaria (60% NaNO₃/40% KNO₃) se pueden utilizar temperaturas hasta 565°C sin apreciar una degradación significativa²⁰⁸, sin embargo, el límite superior de temperatura es variable en función de la cantidad y tipo de impurezas que incorporen las sales de origen industrial.

De entre las posibles impurezas presentes en las sales de origen industrial se encuentra el NaCl, el cual, puede incrementar la temperatura máxima de funcionamiento en ellas²⁰⁹. El efecto del NaCl sobre la viscosidad de las sales de nitrato, así como las

²⁰⁸ Delameter W.R. and Bergen, N.E. Review of Molten Salt Electric Experiment: Solar Central Receiver Project. SAND 86-8249, Sandia National Laboratory, Albuquerque, 1990.

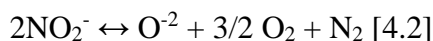
²⁰⁹ Peng Q., Ding J., Wei X., Yang J., Yang X. Applied Energy Vol.87, pág.2812–2817, 2010.

propiedades térmicas fueron estudiada por Bradshaw²¹⁰ que experimentan el efecto de la adición de un 5% de impurezas basadas en cloruros no especificados.

La principal reacción química que se presenta en ellas es la siguiente:



La generación del anión nitrito se produce de forma gradual siendo función de la presión parcial del O_2 , presente en el ambiente. Por otro lado, los aniones nitrito sufren descomposición a altas temperaturas generando diferentes tipos de óxidos, peróxidos y superóxidos²¹¹ mediante la siguiente reacción:



Como se puede observar en la reacción anterior, se generan aniones de oxígeno, nitrógeno molecular y óxidos de nitrógeno apareciendo también, por el efecto del CO_2 atmosférico y su reacción con el O^{2-} la formación de carbonatos²¹² mediante la siguiente reacción:



Contemplando las reacciones anteriores, se puede deducir la descomposición de las sales fundidas por el hecho de darse las mismas a elevadas temperaturas y la generación de compuestos insolubles en los diferentes componentes de una planta termosolar como pueden ser tuberías, válvulas y otros tipos de superficies en contacto con las sales fundidas viéndose favorecido el fenómeno de corrosión debido a los aniones O^{2-} .

El contacto de los aniones O^{2-} con el Fe de la aleación provocan las siguientes reacciones:

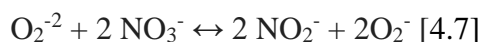


²¹⁰ Bradshaw RW. “*Viscosity of Multi-Component Molten Nitrate Salts—Liquidus to 200°C*”. Sandia Report SAND2010-1129, 2010.

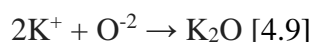
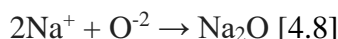
²¹¹ Hatt B.W., Lovering D.G., “*Molten Salt Technology*” Editor, Plenum Press, pág. 438, 1982.

²¹² Jordan J., McCarthy W.B., Zambonin P.G., Mamantov G. “*Molten Salts*” Academic Press Ed., pág.575, 1969.

Mediante el proceso de descomposición de los nitratos alcalinos produce la formación de diferentes iones inestables procedentes del óxido de nitrógeno presente en la sal fundida de nitrato según las siguientes reacciones²¹³:

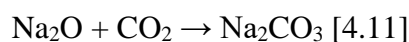
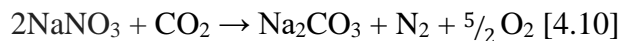


Por otro lado, algunos autores²¹⁴ sostienen la formación de óxidos de Na y K durante el proceso corrosivo que reaccionan según las siguientes reacciones:

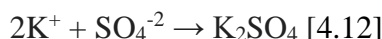


La formación de estos óxidos provoca un movimiento de electrones que induce la reacción catódica que disminuye la acción corrosiva de la sal.

La formación de carbonatos a partir de la sal, se generan por su interacción con el CO_2 atmosférico mediante las siguientes reacciones²¹⁵:



La formación de sulfatos, a partir de los incluidos en la sal como impureza, pueden reaccionar con los iones salinos generándose la siguiente reacción química de formación de sulfatos:



La influencia de la humedad en las sales industriales tiene una influencia directa sobre los nitratos pudiéndose dar una serie de reacciones que generan como productos aniones nitrito e hidróxidos según las siguientes reacciones:



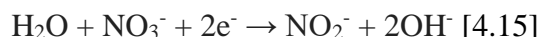
²¹³ Singh I. B., "The Effect of NaCl Addition on the Corrosion of Mild Steel in NaNO_3 Melt". Corrosion Science, USA, N°34(10), pág.1733-1742, 1993.

²¹⁴ Palmisano F., "Catalytic Currents in Fused Salts: Discharge Mechanism of Nitrite in Molten Alkali Nitrates(II)". Journal of Electroanalytical Chemistry and interfacial Electrochemistry, N°89(2), pág.311-320, 1978.

²¹⁵ Kramer C.M., Munir Z.A., and Volponi J.V., "Screening Tests of Sodium Nitrate and Potassium Nitrate Decomposition. Solar Energy", N°29(5), pág.437-439, 1982.

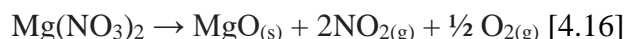


En el medio en que se dan estas reacciones, los anteriores óxidos de Na y K, generados mediante las reacciones anteriores, son más solubles de forma que favorecen la reacción catódica y, por tanto, incrementando la capacidad corrosiva de la sal. Esta teoría se contradice con la de otros autores que consideran que la absorción de agua por los nitratos fundidos es una reacción reversible y no genera aniones óxido.

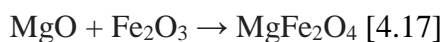


Cabe destacar que, a temperaturas elevadas, la concentración de aniones óxido es muy reducida y pueden aparecer interacciones con otras especies del tipo carbonato o sulfato.

Debido a la necesidad de grandes cantidades de sales de nitratos para su uso industrial como es el caso de las CSP con almacenamiento térmico, dichas sales no presentan un grado de pureza elevado y esto fue observado en estudios realizados sobre las sales fundidas utilizadas en la CSP Solar Two en la que a la temperatura de 566°C, la mezcla salina contenía un 0.05% de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ que a una temperatura cercana a los 482°C descompone según la siguiente reacción química:



Los compuestos de Mg se forman en las capas de oxidación exteriores que se encuentran en contacto con la sal pudiéndose formar MgFe_2O_4 mediante la reacción²¹⁶:



Por este motivo, la sal tuvo que ser purificada antes de emplearla para la eliminación del nitrato de magnesio. La forma de hacerlo fue mediante calentamiento de la sal industrial a 552°C durante 1 mes, aportando una ventilación adicional para la eliminación de los diferentes óxidos de nitrógeno generados. En el conducto de ventilación, se observó la presencia de HNO_3 y HNO_2 generados por la reacción de los óxidos de nitrógeno con el vapor de agua.

²¹⁶ Zimnol M., “Structure and Morphology of MgFe_2O_4 Epitaxial Films Formed by Solid State Reactions on MgO Surfaces. *Solid State Ionics*”, pág.667-672, 1997.

Estudios realizados sobre la degradación de las sales contempladas en esta tesis²¹⁷ comprobaron que impurezas presentes en ellas como el Na_2CO_3 pueden aportar estabilidad térmica en la Sal “Hitec”, lo que se traduce en temperaturas de descomposición térmica más elevadas. La incorporación de un 5% de Na_2CO_3 permitió un incremento en la temperatura de descomposición térmica de la Sal Solar “Hitec” de 30 a 50°C en función de la velocidad de calentamiento.

Para la Sal Solar Binaria, impurezas como NaCl pueden mejorar la estabilidad térmica en 20°C mientras que el Na_2CO_3 en esta sal origina el efecto contrario, ocasiona la disminución de la estabilidad térmica de la sal en 50°C ocasionando efectos perjudiciales sobre la degradación de la sal.

En el caso de la central Solar Two la producción de energía eléctrica era de 10 MW_e y para ello necesitaba alrededor de 1.500 toneladas de sales que emitían 4,5 toneladas de gas durante el tratamiento de eliminación del $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ mediante temperatura²¹⁸. Si esta cantidad se extrapola a una central que genere 100 MW_e , serían necesarias 15.000 toneladas de sales que aportarían unas emisiones de 45 toneladas de gases de óxidos de nitrógeno durante el pretratamiento. Estas emisiones se consideran muy peligrosas ya que según la OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional) norteamericana, el límite de exposición de los trabajadores ante NO_2 no puede superar las 5 ppm debido a que los óxidos de nitrógeno generan ácido en los pulmones y puede provocar explosiones al contacto con determinados compuestos orgánicos.

Desde 1972, la EPA (Environmental Protection Agency) estableció nuevas regulaciones sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno y por ello afectaría a este tipo de tecnología para la generación de mayores cantidades de energía eléctrica pero la tecnología ha conseguido que la eliminación de los óxidos de nitrógeno mediante un proceso sencillo de lavado con corriente de agua que convierte estos óxidos en ácidos que son neutralizados en un segundo paso mediante el uso de amoníaco u otro compuesto básico.

²¹⁷ Gimenez P., Fereres S. “*Effect of heating rates and composition on the thermal decomposition of nitrate based molten salts*” Energy Procedia Vol.69, pág.654–662, 2015.

²¹⁸ Kelly B. “*Lessons Learned, Project History and Operating Experience of the Solar Two Project*”. SAND2000-2598, 2000.

Una vez expuestas las implicaciones de las diferentes impurezas que pueden contener las sales de origen industrial y los productos generados mediante las diferentes reacciones químicas derivadas de su presencia, es conveniente el análisis específico de los posibles componentes de las sales para intuir los procesos de degradación que pudieran generarse y ellos son principalmente:

- SO_4^{2-} : El análisis del contenido en sulfatos nos indica la posibilidad de formación de compuestos de calcio, sodio y potasio que afectan a la fluidez de la sal y por lo tanto su tránsito a lo largo de las conducciones de la central, así como la posibilidad de aparecer procesos de corrosión y erosión en intercambiadores, combas, etc.
- Fe y Cr: El contenido de ambos en la sal después de un proceso corrosivo nos indicará la pérdida de material al haberse deteriorado las capas de óxido protectoras, en el caso del Fe y la pérdida del carácter protector de la aleación en el caso de un aumento de contenido en Cr en la sal.
- Mg: Como se vio con anterioridad, el Mg aparece en las sales en forma de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ con facilidad en la formación de óxidos de magnesio adheridos a la superficie de la aleación.
- Ca: La presencia de este en las sales induce a la formación de compuestos insolubles con aniones sulfato y carbonato desfavoreciendo la fluidez de la sal.
- Cl^- : Es una impureza de gran importancia por ser un gran potenciador de los fenómenos de corrosión.
- NO_2^- : La concentración de nitritos presentes en la sal nos indica la propagación de la reacción de reducción catódica en la sal ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$) y el nivel de evaporación de las distintas especies de óxidos de nitrógeno en ella.
- Humedad: Como se vio en reacciones anteriores, la humedad en la sal provoca un aumento en el carácter corrosivo de la misma.



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
COMPARATIVO DE LAS CENTRALES
CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE
SELECCIONADAS

5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LAS CENTRALES CSP DE RECEPTOR CENTRAL DE TORRE SELECCIONADAS

Mediante el Análisis de Ciclo de Vida de las centrales objeto de estudio de esta tesis se van a poder cuantificar los diferentes impactos ambientales aportados por cada una de ellas. Teniendo en cuenta las disposiciones de las normas ISO 14040 y 14044, los pasos seguidos en el ACV de las plantas seleccionadas se han acogido a su desarrollo y que corresponden a:

- Objetivo y Alcance
- Análisis de Inventario
- Evaluación del Impacto
- Interpretación de Resultados

Como se comentó con anterioridad, la herramienta utilizada para el análisis ha sido el programa informático SimaPro 8.0 que va a hacer posible con las bases de datos, principalmente Ecoinvent, incorporadas al programa, la evaluación medioambiental consistente y sistemática acorde a la normativa y con datos ampliados mediante la herramienta de simulación SAM de NREL que han permitido la optimización de los diferentes componentes seleccionados a partir de los materiales y compuestos que los conforman para las dos plantas de diferente potencia analizadas mediante esta tesis.

La evaluación medioambiental que se va a llevar a cabo, se hará de forma comparativa para determinar la influencia de los materiales y los compuestos de almacenamiento térmico considerados en una misma tecnología termosolar, pero de diferente potencia utilizando la misma base de datos para la elaboración del inventario y evitar la alteración de resultados en el caso del uso de diferentes datos.

Se han considerado los mismos criterios de modelización y la misma versión para los diferentes sistemas debido al constante cambio de los datos medioambientales en cuanto a emisiones, materiales, efectos, impactos o diferentes tecnologías.

El método de evaluación de impacto considerado es ReCiPe mediante el que se van a obtener un gran número de indicadores de categorías de impacto y de daño, enfocadas al punto final y medio.

Los resultados que se van a obtener mediante el ACV se expresan en función de los indicadores con sus respectivas unidades, asociados a las categorías de impacto (*Caracterización*) para obtener la evaluación de daños. La *Normalización* se realiza para evitar las dimensiones en las diferentes categorías y poder establecer comparaciones entre ellas mediante la recopilación de datos de emisiones totales y consumo de recursos causados por el sistema de referencia durante determinado período y el cálculo de las categorías de impacto y a veces del daño, con los factores de caracterización y daño. La *Ponderación* es un paso opcional en el que se tiene en cuenta la perspectiva social que influye en la evaluación de las categorías a la que se llega por la valoración de un grupo de expertos.

5.1.- Objetivo y alcance del ACV

El principal objetivo de este ACV es realizar un análisis comparativo de los posibles impactos ecológicos generados por las dos plantas CSP de receptor central de torre basándonos, principalmente, en los dos compuestos utilizados para el almacenamiento térmico (sales fundidas estudiadas, sal solar binaria y sal “Hitec”).

Así pues, el análisis se va a desarrollar de la siguiente manera:

- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de la central de 19,9 MW_e con almacenamiento térmico mediante sales fundidas de sal solar binaria comparado con la misma central, pero mediante la sal fundida Hitec.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de la central de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante sales fundidas de sal solar binaria comparado con la misma central, pero mediante la sal fundida Hitec.

Mediante estos análisis se comprobará cuál de ellas es medioambientalmente más competitiva y los procesos junto con los materiales y compuestos considerados, más decisivos para el cumplimiento ambiental de cada planta seleccionada, tomando como límites del sistema la fabricación de las instalaciones en las que se incluye los procesos

de montaje de la instalación con sus componentes y transporte, pero no las operaciones y mantenimiento por no disponer de la suficiente información.

La unidad funcional que se va a tomar en el estudio va a venir definida por 1p. o unidad correspondiente a cada una de las centrales con un tiempo de vida de 25 años y para obtener unos resultados objetivos se considera la misma ubicación para las centrales seleccionadas, en la localidad de Fuentes de Andalucía, provincia de Sevilla.

Para el estudio del alcance se ha considerado la generación de energía eléctrica centralizada mediante grandes y medias plantas CSP para su vertido a la red eléctrica y la modelización de las plantas se ha realizado mediante los distintos componentes de la planta, que son dependientes de los materiales y compuestos seleccionados que intervienen en la operativa de las CSP.

Los materiales y compuestos considerados para este estudio han sido seleccionados y ampliados a partir de la base de datos de SimaPro 8.0, Ecoinvent²¹⁹. Para el caso de la composición de la aleación HRSA rica en Ni, INCONEL 617, al no encontrarse como tal en la base de datos, se ha procedido a generar su composición mediante la combinación de los diferentes aleantes que componen el material.

Los procesos que se han tenido en cuenta son los correspondientes a la transformación de materiales para la fabricación de los componentes de los diferentes sistemas considerados y no se han tenido en cuenta los procesos de montaje y ensamblado, pero sí el transporte asociado a los materiales y no al conjunto.

Para el escenario de residuo se ha tenido en cuenta el reciclado de los materiales considerados en el estudio.

²¹⁹ Ecoinvent v.3 Database Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/>.

5.2.- Modelización de las CSP de receptor central seleccionadas

Para la obtención de los datos a incorporar en el inventario de la herramienta SimaPro 8.0 para las centrales de las potencias consideradas, se han tenido en cuenta los siguientes sistemas:

- Receptor
- Estructura de los tanques de almacenamiento térmico (frío y caliente)
- Cantidad de sales fundidas en el sistema
- Conducciones para los sistemas considerados
- Bloque de potencia

Las cantidades de materiales y compuestos presentes en estos sistemas, se han extraído mediante la revisión bibliográfica más actualizada, basándonos en los valores que se arrojan para la tecnología de receptor central de torre de plantas de potencia similar a partir de los datos obtenidos de la simulación efectuada con la herramienta SAM de NREL.

Seguidamente, se pasan a tratar de forma individualizada los sistemas que se han tenido en cuenta con los datos obtenidos y los cálculos realizados para la implementación en las centrales de las potencias consideradas:

- *Receptor*: El tipo de receptor seleccionado para ambas plantas ha sido el de geometría cilíndrica debido a que es el más indicado para operar con sales fundidas.

Los datos que se han tenido en cuenta para cada uno de ellos han sido los siguientes:

CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR EN PLANTA DE 19 MW_e

Diámetro del receptor	8,8 metros
Altura del receptor	12,8 metros
Número de paneles de tubos	20 paneles
Número de tubos por panel	40 tubos
Longitud de los tubos	12 metros
Diámetro exterior de los tubos	40 milímetros
Espesor de los tubos	1,25 milímetros
Material de los tubos	INCONEL 617

Tabla 5.1: Datos considerados en el receptor de la planta correspondiente a 19 MW_e

En este estudio, se ha tenido en cuenta el peso de los tubos que componen el receptor y que son de la aleación INCONEL 617.

La expresión utilizada para el cálculo del peso de los tubos de este material es la correspondiente a la Ecuación 18:

$$M = V \cdot \rho \text{ [Ecuación 18]}$$

M : Corresponde a la masa de material que deseamos conocer, expresada en Kg/m.

V : Volumen del material considerado. Expresado en m³.

ρ : Densidad correspondiente al material considerado, expresado en Kg/m³.

La densidad del material se ha obtenido de valores consultados en diversas fuentes bibliográficas y el volumen (V) se calcula mediante la Ecuación 19 reflejada más abajo:

$$V = (\phi_e^2 - \phi_i^2) \pi \cdot h / 4 \text{ [Ecuación 19]}$$

V : Volumen de la tubería considerada, expresado en m³.

ϕ_e : Diámetro exterior de la tubería, expresado en m.

ϕ_i : Diámetro interior de la tubería, expresado en m.

h : Altura o longitud de la tubería, expresado en m.

Sustituyendo los valores aportados en la Tabla 5.1, en las ecuaciones consideradas se obtiene el peso correspondiente a un tubo de las características anteriormente mencionadas y el producto por el número de tubos correspondientes a los diferentes paneles nos va a proporcionar la masa total de material considerado en el receptor correspondiente a la central termosolar de 19 MW_e. De esta manera, se obtiene lo siguiente:

Peso obtenido para cada tubo de 12 metros: 15,412 Kg.

El peso total del material INCONEL 617 a utilizar en el receptor vendrá dado por:

$$20 \text{ (Paneles)} \cdot 40 \text{ (Tubos/Panel)} = 800 \text{ (Tubos)}$$

Teniendo en cuenta el cálculo del peso unitario del tubo, 15,412 Kg/Tubo, obtenemos el peso total de aleación INCONEL 617, que corresponde a:

$$M_{\text{total INCONEL 617 Planta 19 MW}_e} = 15,412 \text{ Kg.} \cdot 800 \text{ Tubos} = 12,33 \text{ Toneladas INCONEL 617}$$

Para el caso de la planta correspondiente a 100 MWe, se aplican las mismas ecuaciones, 18 y 19, que en el caso anterior de la planta de 19 MWe.

CARACTERÍSTICAS DE RECEPTOR EN PLANTA DE 100 MWe

Diámetro del receptor	17,23 metros
Altura del receptor	21,5 metros
Número de paneles de tubos	20 paneles
Número de tubos por panel	40 tubos
Longitud de los tubos	21 metros
Diámetro exterior de los tubos	60 milímetros
Espesor de los tubos	1,70 milímetros
Material de los tubos	INCONEL 617

Tabla 5.2: Datos considerados en el receptor de la planta correspondiente a 100 MWe.

Mediante la Tabla 5.2, se incorporan los resultados para el receptor de la planta de 100 MWe, para realizar los cálculos como se hicieron anteriormente.

Peso obtenido para cada tubo de 12 metros: 55,185 Kg.

El peso total del material INCONEL 617 a utilizar en el receptor vendrá dado por:

$$20 \text{ (Paneles)} \cdot 40 \text{ (Tubos/Panel)} = 800 \text{ (Tubos)}$$

Teniendo en cuenta el cálculo del peso unitario del tubo, 55,185 Kg/Tubo, obtenemos el peso total de aleación INCONEL 617, que corresponde a:

$$M_{\text{total INCONEL 617 Planta 100 MWe}} = 55,185 \text{ Kg.} \cdot 800 \text{ Tubos} = 44 \text{ Toneladas INCONEL 617}$$

- *Estructura de los tanques de almacenamiento térmico (frío y caliente):* Como paso posterior a la selección del compuesto para el almacenamiento térmico, es de suma importancia la selección de los materiales que se van a encontrar en contacto con ellos para conseguir, principalmente, dos fines, uno para la mejora de la transferencia térmica y otra que se traten de materiales resistentes al ambiente agresivo que aporten dichos compuestos en contacto con el material. De esta manera, el material seleccionado para albergar el compuesto de almacenamiento térmico, ha de ser compatible con él.

Como consecuencia de esto, los materiales seleccionados para albergar el compuesto a utilizar para el almacenamiento térmico, ha de cumplir con determinadas exigencias como son dureza, flexibilidad, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión para conseguir estabilidad estructural.

De estos factores, el principal es el debido a la corrosión que deteriora el material aportando determinados compuestos que degradan el propio compuesto utilizado para el almacenamiento térmico como el material que lo contiene. La consecuencia de este proceso es debido a otro factor comentado como es el de la estabilidad térmica y es que, durante la repetición de los ciclos térmicos, aumenta el proceso de oxidación a elevada temperatura comentado en apartados anteriores de tal manera que estudios realizados para este tipo de procesos, determinaron que el fenómeno de corrosión en determinados aceros comerciales, se ven seriamente afectados por las impurezas que contienen las sales de grado comercial mientras que en los aceros inoxidables y las aleaciones resistentes a elevada temperatura ven minimizado o nulo este proceso²²⁰.

Para el caso que nos ocupa, y teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, se han seleccionado dos tipos de materiales en función de la temperatura de las sales que van a contener y estos son el acero inoxidable austenítico AISI 347H para el tanque de sales frías (290°C), a 290°C, y la aleación base Ni resistente a elevadas temperaturas INCONEL 617, para el tanque de sales calientes (565°C), a 565°C.

El espesor nominal de la lámina se refiere al cuerpo del tanque como es construido. Los espesores especificados están basados en los requerimientos de montaje, según refleja la Tabla 5.3:

Diámetro del Tanque (m.)	Espesor de lámina (mm.)
< 15	5
15 hasta < 36	6
36 hasta 60	8
> 60	10

Tabla 5.3: Espesor de lámina de tanque en función del diámetro requerido.
Fuente: ASME: Diseño y construcción de tanques de almacenamiento. Código API 650

Para el cálculo de la masa de materiales utilizados en los dos depósitos se han tenido en cuenta las dimensiones aportadas por el programa informático de simulación SAM de NREL que se reflejan en la tabla inferior, Tabla 5.4 habiendo considerado las dimensiones de los dos depósitos, iguales:

²²⁰ Kuravi S., Jamie Trahan J., Goswami D.Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K., “*Thermal Energy Storage Technologies and Systems for Concentrating Solar Power Plants*”. Progress in Energy and Combustion Science, N°39, pág.285-319, 2013.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS DE SALES EN PLANTA DE 19 MWe

Radio del Depósito	7,16 metros
Altura del Depósito	20 metros
Espesor de la chapa de material	0,006 metros
Densidad aleación INCONEL 617	8,36 Ton/m ³
Densidad acero AISI 347H	7,93 Ton/m ³

Tabla 5.4: Datos considerados en los depósitos de sales para la planta correspondiente a 19 MWe.

En base a los datos aportados en la Tabla 5.4, se ha calculado el volumen mediante las siguientes expresiones:

$$S_L : 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S_C : 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad S_T = S_L + S_C$$

S_L : Superficie del cuerpo en m².

S_C : Superficie de la base y la tapa en m².

S_T : Superficie total en m².

$$V = S_T \cdot e \text{ [Ecuación 20]}$$

V : Volumen del material considerado. Expresado en m³.

e : Espesor de la chapa formadora del depósito. Expresada en m.

S_T : Superficie total incluyendo cuerpo del depósito, base y tapa. Expresada en m².

Una vez calculado el V , podemos calcular la masa de material correspondiente a ese depósito mediante la Ecuación 18:

$$M = V \cdot \rho \text{ [Ecuación 18]}$$

Aplicando estas ecuaciones con los datos obtenidos en la Tabla 5.4, se obtienen los siguientes resultados para los depósitos de almacenamiento térmico de la central de 19 MWe:

$$M_{\text{depósito sales frías (290°C) Planta 19 MWe}} = 58,136 \text{ Toneladas de acero AISI 347H}$$

$$M_{\text{depósito sales calientes (565°C) Planta 19 MWe}} = 61,288 \text{ Toneladas de aleación INCONEL 617}$$

CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS DE SALES EN PLANTA DE 100 MWe

Radio del Depósito	16,42 metros
Altura del Depósito	20 metros
Espesor de la chapa de material	0,006 metros
Densidad aleación INCONEL 617	8,36 Ton/m ³
Densidad acero AISI 347H	7,93 Ton/m ³

Tabla 5.5: Datos considerados en los depósitos de sales para la planta correspondiente a 100 MWe.

Para el cálculo de la masa de materiales a emplear en la Planta de 100 MWe se han utilizado las mismas expresiones que en el caso de la Planta de 19 MWe, pero utilizando los datos de la Tabla 5.5 obteniéndose los siguientes resultados:

$$M_{\text{Depósito sales frías (290°C) Planta 100 MWe}} = 178,779 \text{ Toneladas de acero AISI 347H}$$

$$M_{\text{Depósito sales calientes (565°C) Planta 100 MWe}} = 188,467 \text{ Toneladas de aleación INCONEL 617}$$

- *Masa de sales fundidas en el sistema:* Debido a sus propiedades físico químicas, se trata de unos compuestos óptimos para el almacenamiento térmico al presentar elevada densidad, elevada capacidad calorífica, elevada temperatura y baja presión de vapor. De entre todas, las sales de nitratos de metales alcalinos y alcalinotérreos son las idóneas para esta aplicación teniendo presente que las mezclas eutécticas presentan puntos de fusión inferiores a los de las sales en estado puro.

El inconveniente de las sales comerciales, como son las utilizadas en la tecnología termosolar, es su comportamiento frente al fenómeno de corrosión de los materiales en contacto con las sales utilizadas y por otro lado el punto de cristalización que para el caso de la sal solar binaria es de 220°C y que obliga a un consumo extra de energía para mantener las diferentes zonas de la planta por la que fluyen las sales, a una temperatura superior a esta.

Nombre comercial	Composición	T_{fusión} (°C)	T_{descomp.} (°C)
Sal Solar	60% NaNO ₃ /40% KNO ₃	220	580
Hitec	7% NaNO ₃ /53% KNO ₃ /40% NaNO ₂	142	538

Tabla 5.6: Características de los compuestos seleccionados para almacenamiento térmico

Por los anteriormente expuesto, lo deseable es la elección de compuestos que permitan el almacenamiento térmico que presenten alta estabilidad térmica, amplio rango de trabajo y bajo costo. Las sales seleccionadas en este trabajo difieren, una de otra, en la composición química y en sus propiedades físicas teniendo, como se verá más adelante, una gran influencia en los resultados obtenidos mediante el estudio de ACV en este estudio.

Para nuestro caso de estudio se han calculado los pesos de los dos tipos de sales aplicados a cada una de las tecnologías sujetas a estudio, es decir, por un lado, la sal solar binaria para la planta de 19 MW_e y para la de 100 MW_e, por otro lado, la sal solar Hitec para la planta de 19 MW_e y para la de 100 MW_e.

Para el cálculo de la masa de sales se ha tomado el volumen de las sales aportado por la simulación efectuada mediante el programa informático SAM de NREL aplicando la expresión matemática correspondiente a la Ecuación 18:

$$M = V \cdot \rho \text{ [Ecuación 18]}$$

M: Corresponde a la masa de sales fundidas que deseamos conocer. Expresada en Toneladas.

V: Volumen de sales fundidas. Expresado en m³.

ρ: Densidad correspondiente al material considerado, expresado en Tn/m³.

Para los valores correspondientes a las densidades se han considerado a las temperaturas de las sales calientes (565°C) y las sales frías (290°C) para cada una de las sales objeto de estudio.

Estado de Sal Fundida	ρ Sal Solar Binaria (Tn/m ³)	ρ Sal Solar Hitec (Tn/m ³)
Sal caliente (565°C)	1,730	1,670
Sal fría (290°C)	1,910	1,915

Tabla 5.7: Valores de la densidad de los dos tipos de sales en las dos condiciones de trabajo

Mediante los valores de la Tabla 5.7 y aplicando la Ecuación 18 se obtienen los siguientes valores de masa de sales para cada una de las plantas de diferente potencia consideradas en el estudio:

Estado y Tipo de Sal Fundida	Masa Planta 19 MWe (Toneladas)	Masa Planta 100 MWe (Toneladas)
Sal caliente (565°C) Binaria	1.670	8.000
Sal fría (290°C) Binaria	4.303	22.527
Sal caliente (565°C) Hitec	1.612	4.486
Sal fría (290°C) Hitec	4.314	22.705

Tabla 5.8: Masa de Sales Fundidas de los dos tipos, para las dos Plantas

- *Conducciones para los sistemas considerados:* Los mayores problemas que suceden en las conducciones utilizadas para el transporte de las sales fundidas son los ocasionados por la corrosión debida a las sales fundidas utilizadas como compuestos para almacenamiento térmico y una mala distribución del traceado eléctrico en todo su recorrido que puede provocar la congelación de las sales produciendo un mal desarrollo de los ciclos térmicos. Como se vio anteriormente, la presencia de impurezas en las sales fundidas, son las responsables de la aceleración del proceso de corrosión mediante reacciones químicas expuestas en capítulos anteriores.

Estudios realizados sobre el tipo de material utilizado para estas conducciones, indican que el acero al carbono puede ser válido para el transporte de la sal fría (290°C) y un acero inoxidable rico en Cr, o aleaciones ricas en Ni, como los considerados en esta tesis, se consideran idóneos para el transporte de las sales calientes (565°C).

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido la consideración de materiales muy especiales para conseguir minimizar los efectos de la corrosión sobre ellos por el uso de sales impuras para lograr un mayor número de ciclos que permitan la resistencia de estos materiales durante el período de vida de la central y, por tanto, sin tener en cuenta el aspecto económico, conseguir que el rendimiento sea óptimo, así como el aspecto medioambiental. Las aleaciones consideradas, son específicas para el contacto con las sales fundidas presentando unas tasas de corrosión aceptables.

Los datos de la masa de materiales considerados para las conducciones han sido extraídos del inventario efectuado por Viebahn P.²²¹ para la central correspondiente a 19

²²¹ Viebahn P., *Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants*, Project no: 502687, NEEDS, 2008.

MW_e y, por otro lado, para la de 100 MW_e, extraídos del inventario proporcionado por Craig T. et al²²².

Teniendo en cuenta los estudios de Kelly²²³ que afirma que aceros inoxidable como los AISI 321 y AISI 347 y las aleaciones ricas en Ni como INCONEL son inmunes al estrés y a la corrosión por agrietamiento, se ha considerado el uso de acero AISI 347H para el circuito de conducciones de las sales frías (290°C) y INCONEL 617 para el circuito que transporta las sales calientes (565°C), en las dos centrales consideradas. Los valores correspondientes a la masa de material e cada caso, se exponen en la Tabla 5.9:

Material	Masa Planta 19 MW _e (Toneladas)	Masa Planta 100 MW _e (Toneladas)
AISI 347H	28,5	50,0
INCONEL 617	28,5	67,0

Tabla 5.9: Masa de materiales para las conducciones en las dos Plantas consideradas.

El trazado de tuberías considerado ha sido el correspondiente a generador de vapor → tanque de sales frías (290°C) → entrada al receptor, para el de sales frías (290°C) y salida del receptor → tanque de sales calientes (565°C) → generador de vapor.

Se han considerado como propiedades dimensionales de las tuberías, las aportadas por la bibliografía correspondiente al inventario, que no ha permitido cálculos de mayor precisión de estos datos, sólo aportan cantidades de materiales que hemos tenido que implementar para nuestro caso.

- *Bloque de Potencia*: Para el estudio de los materiales que componen el bloque de potencia se ha considerado, principalmente, el generador de vapor.

Se ha supuesto el uso exclusivo de la aleación rica en Ni, INCONEL 617 tomando como masa aproximada de este la aportada por el inventario realizado por Viebahn P. en el proyecto *Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants, Project no: 502687*, del apartado Power Block para la central de 19 MW_e y para la de 100 MW_e, la considerada por Craig T. en *Domestic Material Content*

²²² Craig T., Parthiv K., Sertac A., and Flores F. “Domestic Material Content in Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants”, Technical Report NREL/TP-5500-64429, August 2015.

²²³ Kelly B. Lessons Learned, “Project History and Operating Experience of the Solar Two Project”. SAND2000-2598, 2000.

in *Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants*, Technical Report NREL/TP-5500-64429 en el apartado Steam Generator System.

Los valores extraídos de estos inventarios se resumen en la Tabla 5.10:

Material	Masa Planta 19 MWe (Toneladas)	Masa Planta 100 MWe (Toneladas)
INCONEL 617	4,6	254,0

Tabla 5.10: Masa de materiales para el Bloque de Potencia de las dos Plantas consideradas

5.3.- Resultados Obtenidos

En este apartado, considerando los resultados obtenidos se van a valorar de forma comparativa, los Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las correspondientes aleaciones consideradas respecto de los elementos que contienen de tal forma que se podrá establecer cuál de las aleaciones presenta un mayor impacto medioambiental con la idea de seleccionar, desde este punto de vista, el material más ventajoso.

Se efectuará el mismo procedimiento para las sales fundidas como compuesto de almacenamiento térmico, a partir de los resultados individuales obtenidos en el ACV realizado en apartados anteriores.

Posteriormente, se procederá a la evaluación medioambiental de cada configuración de Planta de diferente potencia, realizando un ACV para cada una de ellas con diferente compuesto de almacenamiento térmico para finalizar con una evaluación medioambiental comparativa de cada planta con cada una de las sales fundidas contempladas en el estudio.

Finalmente, se expondrán las conclusiones resultantes de los análisis anteriores.

5.3.1.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las aleaciones

Para establecer la comparativa entre los materiales seleccionados para las plantas termosolares objeto de estudio ha sido necesario el Análisis de Ciclo de Vida individual de cada uno de los materiales tomando como unidad funcional comparativa la misma para los dos que se ha considerado 1kg de material.

Se procedió a comparar 1 kg. de superaleación INCONEL 617 con 1 kg. de acero inoxidable AISI 347H. A partir los valores de las diferentes categorías de impacto para cada uno de los materiales se obtuvo la Tabla 5.11 correspondiente a la caracterización del análisis comparativo.

Categoría de Impacto	Unidades	INCONEL 617	AISI 347H
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	16,7	6,73
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	$9,4 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,48	0,167
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	419	10,2
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,259	0,0377
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,416	0,0461
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	2,99	1,52
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	0,783	0,234
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	0,949	0,0914
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,00528	0,00113
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	506	254
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	106	14,2
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	4,18	1,71

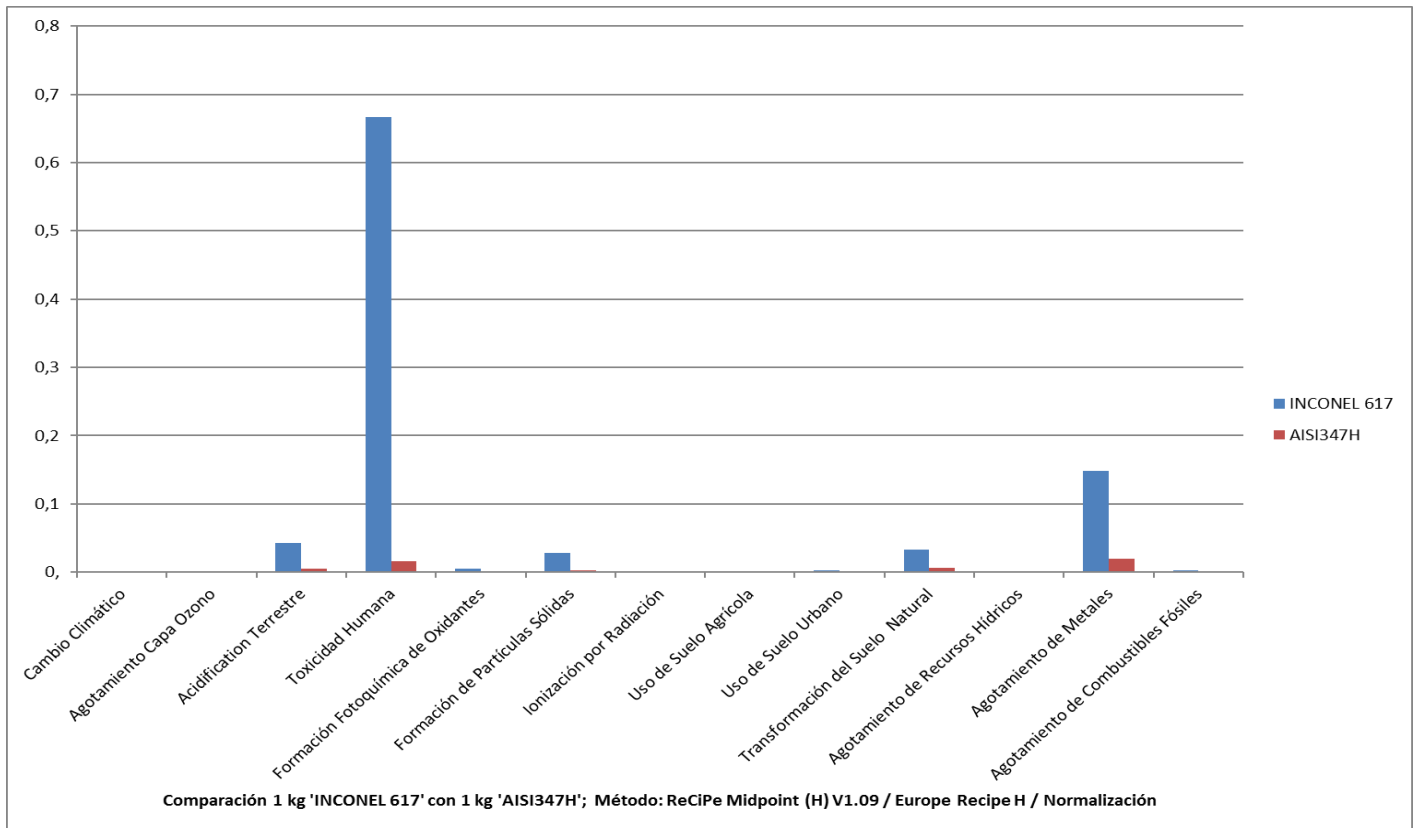
Tabla 5.11: Tabla de caracterización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la superaleación HSRA INCONEL 617 y el acero inoxidable AISI 347H

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Se observa que los valores para todas las categorías de impacto son bastante superiores en el caso del INCONEL 617 respecto del AISI 347H destacando los que corresponden a la categoría de Toxicidad Humana que arroja un valor para el primero de 419 kg.1,4-DB_{equiv} frente a los 10,9 kg.1,4-DB_{equiv} del segundo.

Otra categoría que presenta una gran disparidad de valores es la correspondiente al Agotamiento de Metales con un valor de 106 kg.Fe_{equiv} para el INCONEL 617 y 14,2 kg.Fe_{equiv} para el acero AISI 347H.

A partir de la comparativa de los valores de la Tabla 5.11, se obtuvo la Gráfica 5.1 correspondiente a la normalización y que se muestra a continuación.



Gráfica 5.1: Gráfico comparativo de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de superaleación INCONEL 617 con 1 kg. de acero inoxidable AISI 347H con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

En el Gráfico 5.1 correspondiente a la normalización se aprecia que el de mayor carga ambiental corresponde al impacto sobre la Toxicidad Humana y en concreto la superaleación INCONEL 617 debido al contenido e Ni del material cuyos efectos sobre la salud humana son muy negativos. Igualmente, sobre el agotamiento de metales, aunque en menor medida ya que el índice presenta un valor muy inferior. El resto de categorías de impacto presentan unos valores muy pequeños.

Etiqueta de Categoría	INCONEL 617	AISI 347H
Cambio Climático	0,0015	0,0006
Agotamiento Capa Ozono	$4,27 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-5}$
Acidificación Terrestre	0,043	0,0049
Toxicidad Humana	0,6668	0,0162
Formación Fotoquímica de Oxidantes	0,0046	0,0007
Formación de Partículas Sólidas	0,0279	0,003
Ionización por Radiación	0,0005	0,0002
Uso de Suelo Agrícola	0,0002	$5,18 \cdot 10^{-5}$
Uso de Suelo Urbano	0,0023	0,0002
Transformación del Suelo Natural	0,0327	0,007
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0
Agotamiento de Metales	0,1489	0,0198
Agotamiento de Combustibles Fósiles	0,0027	0,001

Tabla 5.12: Valores comparativos obtenidos en Normalización para INCONEL 617 y AISI 347H

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Los valores numéricos adimensionales correspondientes a las diferentes categorías de impacto para la normalización se presentan seguidamente mediante la Tabla 5.12. En ella se observa que los valores más elevados corresponden a la categoría de Toxicidad Humana correspondiente a la superaleación INCONEL 617, muy superior al acero inoxidable AISI 347H. El mismo caso se da para la categoría de Agotamiento de Metales para la que la superaleación INCONEL 617, también presenta un valor muy superior al del acero.

En general, en todas las categorías de impacto, la carga medioambiental aportada por el acero inoxidable AISI 347H es bastante inferior a la de la superaleación base Ni, INCONEL 617.

De todo esto se puede deducir que el material a emplear, medioambientalmente más respetuoso, es el acero inoxidable AISI 347H con propiedades técnicas para esta aplicación inferiores a la superaleación INCONEL 617 pero con mejores características ambientales.

5.3.2.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las sales fundidas

En este apartado se va a realizar un Análisis de Ciclo de Vida Comparativo entre las sales fundidas seleccionadas para el almacenamiento térmico de las plantas objeto de estudio y para ello se realizó, al igual que con los materiales, un ACV individual de cada una de las sales inorgánicas tomando como unidad funcional comparativa la misma para los dos que corresponde a 1kg.

Para poder determinar qué tipo de sal es la más respetuosa con el medio ambiente, se procedió a realizar un ACV comparativo entre 1 kg. de Sal Solar Binaria con 1 kg. de Sal Solar Ternaria “Hitec”. Como se explicó anteriormente, la diferencia entre ambas sales radica en la incorporación de nitritos a la sal ternaria y una concentración de NaNO_3 muy inferior a la que presenta la sal binaria.

A partir los datos de inventario obtenidos a partir de la composición de los dos tipos de sales, se obtuvieron las diferentes categorías de impacto con sus respectivas unidades, para cada uno de los compuestos y que son reflejados en la Tabla 5.13 correspondiente a la caracterización del análisis comparativo.

Categoría de Impacto	Unidades	Sal Solar Binaria	Sal Solar Ternaria Hitec
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	401	291
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,71	1,48
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	106	98
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	0,955	0,867
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	0,502	0,47
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	21,2	24,7
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	6,03	5,4
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	2,71	2,73
Transformación del Suelo Natural	m ²	0,0416	0,0365
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	384	461
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	22,9	19
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	61,7	59,8

Tabla 5.13: Tabla de caracterización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la Sal Solar Binaria y la Sal Solar Ternaria “Hitec”.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Como se vio anteriormente en el ACV individualizado de las sales fundidas, el elemento que aportaba un mayor impacto medioambiental era el Na y por este motivo la disparidad existente entre los diferentes valores de las categorías de los dos tipos de sales.

En la categoría de Cambio Climático el impacto es muy superior en la sal binaria (401 kg.CO₂ equiv) que en la Hitec (291 kg.CO₂ equiv) y esto se debe a la gran influencia que tiene el Na sobre ella.

El resto de los valores correspondientes a las diferentes categorías de impacto son similares y presentan poca diferencia numérica entre ambas sales.

Mediante la Tabla 5.13 se pueden deducir las mejoras ambientales de la sal solar “Hitec” en todas las categorías excepto para la correspondiente al agotamiento de la capa de ozono, la ionización por radiación y el agotamiento de recursos hídricos.

Seguidamente se obtiene el Gráfico 5.2 correspondiente a la normalización que nos permitirá observar cuales son las categorías que aportan mayor carga medioambiental siendo previsible que se obtendrán los impactos mayores para las categorías que se vean afectadas por la aparición de sodio y en las que las apariciones de óxidos de nitrógeno en sus diferentes formas tengan un peso importante sobre ellas.

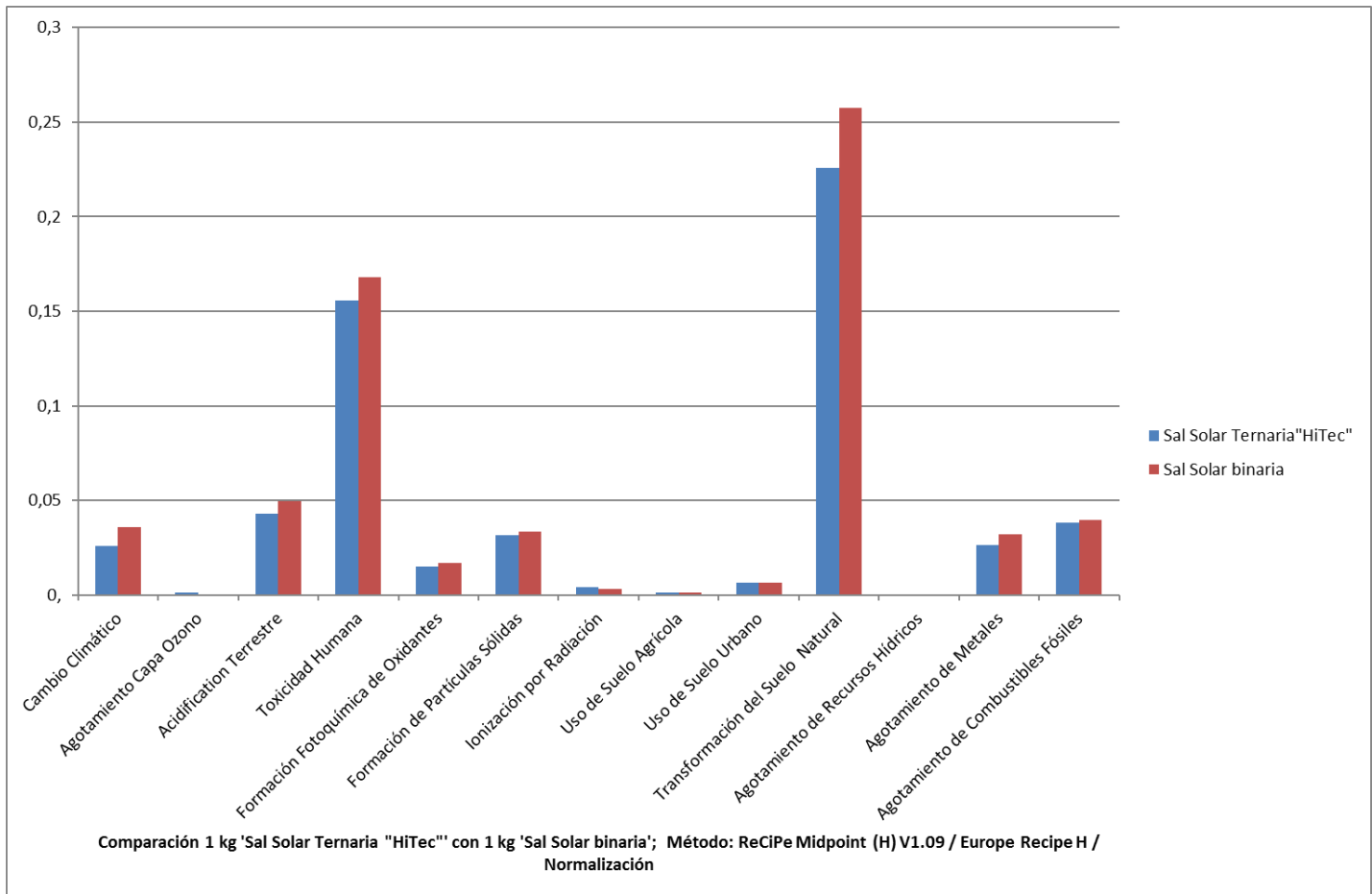


Gráfico 5.2: Gráfico comparativo de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 kg. de sal solar binaria con 1 kg. de Sal Solar Ternaria “HiTec” con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

A partir del Gráfico 5.2 de normalización se comprueba que las categorías de impacto que aportan mayor carga ambiental son las correspondientes a la Transformación Natural de la Tierra seguido de la Toxicidad Humana.

Mediante el primero, como se explicó anteriormente, el impacto se produce sobre un área determinada, de carácter temporal pudiendo ser reversible o irreversible. Este factor puede ser debido a la extracción del mineral nitrato que es la fuente de obtención de los nitratos para su posterior síntesis y es por ello la importante aportación de ambas sales a esta categoría de impacto.

La segunda en importancia es la correspondiente a la Toxicidad Humana y en ella toman especial relevancia los factores de ecotoxicidad que para este caso estaría representado por las emisiones al aire de los diferentes óxidos de nitrógeno por descomposición de los nitratos y nitritos presentes en las sales fundidas.

Otras categorías a tener en cuenta son la Acidificación debida a la descomposición del HNO_3 formado a partir de los nitratos de las sales y por lo tanto la aparición de óxidos de nitrógeno en el ecosistema que pueden variar la acidez del medio.

La categoría correspondiente al Cambio Climático también se ve afectada por el efecto de la absorción de la radiación solar por los gases generados por los nitratos, óxidos de nitrógeno que son algunos de los responsables del efecto invernadero.

La categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles es debido a su consumo en la producción de los nitratos que componen las sales fundidas.

Los valores numéricos adimensionales correspondientes a las diferentes categorías de impacto para la normalización se presentan seguidamente mediante la Tabla 5.14 de la página siguiente.

Etiqueta de Categoría	Sal Solar Binaria	Sal Solar Ternaria Hitec
Cambio Climático	0,0357	0,026
Agotamiento Capa Ozono	0,0005	0,0013
Acidificación Terrestre	0,0497	0,0432
Toxicidad Humana	0,1678	0,1558
Formación Fotoquímica de Oxidantes	0,0168	0,0153
Formación de Partículas Sólidas	0,0337	0,0315
Ionización por Radiación	0,0034	0,004
Uso de Suelo Agrícola	0,0013	0,0012
Uso de Suelo Urbano	0,0067	0,0067
Transformación del Suelo Natural	0,2576	0,2257
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0
Agotamiento de Metales	0,032	0,0266
Agotamiento de Combustibles Fósiles	0,0396	0,0385

Tabla 5.14: Valores comparativos obtenidos en Normalización para la sal Solar Binaria y la Sal Solar Ternaria “Hitec”
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Analizando la tabla comparativa de valores para ambos compuestos se observa que los valores más relevantes corresponden a las categorías de impacto de Transformación del Suelo Natural y Toxicidad Humana, tomando para la primera valores más elevados que para la segunda. El resto de valores correspondientes al resto de categorías, se encuentran muy por debajo de las mencionadas anteriormente.

5.3.3.- Evaluación medioambiental de cada configuración de Planta

En este apartado se va a realizar la evaluación medioambiental de las diferentes configuraciones de las Plantas termosolares contempladas y que van a ser analizadas independientemente para cada uno de los tipos de sal fundida consideradas en este trabajo.

Las configuraciones seleccionadas serán la Planta termosolar de 19 MW_e y la de 100 MW_e, cada una operando individualmente con un sistema de almacenamiento térmico mediante sal solar binaria y posteriormente mediante sal solar ternaria Hitec. Las diferentes configuraciones serán sometidas a un Análisis de Ciclo de Vida. Posteriormente se realizará un nuevo ACV comparativo entre las Plantas termosolares de la misma potencia mediante el que se determinará cuál de los dos sistemas de almacenamiento térmico presenta mayores beneficios medioambientales con respecto a las diferentes categorías de impacto.

La aplicación del proceso completo se efectuará mediante el método de evaluación de impacto ReCiPe, al igual que se hizo con los ACV anteriores y utilizando como base de datos Ecoinvent 3.0 a partir de la cual se obtendrán los datos de inventario necesario, ajustado a las configuraciones seleccionadas.

5.3.3.1.- ACV Planta 19 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Binaria

Se realizará la evaluación medioambiental de una Planta termosolar de potencia 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante sal solar binaria con un Análisis de Ciclo de Vida a partir de los datos de inventario presentados en el apartado 5.3 para la central termosolar seleccionada.

Por ello, se han considerado, como unidad funcional 1p. (una planta completa) y para el inventario, las cantidades de materiales y compuestos calculados para los diferentes sistemas considerados en la central termosolar y que se resumen en la Tabla 5.15 de la página siguiente.

Los sistemas considerados han sido seleccionados de acuerdo a la importancia de los materiales que se han tenido en cuenta en este estudio y por ello su influencia sobre el impacto medioambiental por sus características determinadas.

Sistema	AISI 347H (Tn)	INCONEL 617 (Tn)	Sal Solar Binaria (Tn)
Receptor	-	12,33	-
Depósitos	58,136	61,288	-
Sales calientes (565°C)	-	-	1.670
Sales frías (290°C)	-	-	4.303
Conducciones	28,5	28,5	-
Bloque de Potencia	-	4,6	-

Tabla 5.15: Cantidades de materiales y compuestos de los sistemas de la Planta de 19 MWe considerados, para Sal Solar Binaria, expresados en Toneladas.
Fuente: Elaboración propia

Los datos de la tabla son los correspondientes a los cálculos realizados en el apartado 5.3 a partir de los resultados obtenidos con el software de simulación SAM y la revisión bibliográfica²²⁴.

Las consideraciones que se han tenido en cuenta para el estudio han sido las siguientes:

* *Receptor*: Debido a las condiciones extremas en las que trabaja, debidas a las elevadas temperaturas provocadas por la incidencia de los rayos solares procedentes de los heliostatos mediante reflexión, se considera como único material la HRSA INCONEL 617 considerando las excelentes características físicas y mecánicas que aporta tratándose de un material idóneo para el sistema.

* *Depósitos de sales*: Debido a que contienen la misma sal, pero a diferente temperatura, se ha considerado para el depósito de sales frías (290°C) el acero inoxidable AISI 347H y para el de sales calientes (565°C) la HRSA INCONEL 617. Como se indicó anteriormente, no se ha tenido en cuenta el aspecto económico a la hora de la selección de los diferentes materiales y compuestos.

* *Sales fundidas*: Para las sales fundidas se ha considerado un volumen global para todo el circuito y en un momento determinado de ciclo de operación.

²²⁴ Viebahn P, Kronshage S., Trieb F., Lechon Y. "Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants", DLR, CIEMAT. pág.88, 2004.

* *Conducciones*: Para las conducciones se ha tenido en cuenta el trazado desde el generador de vapor hasta el depósito de sales frías (290°C) y desde este al receptor de torre y para las calientes desde el receptor hasta el tanque de sales calientes (565°C) y de este al generador de vapor. Se considera que el trazado para ambos es aproximadamente igual. Al no disponer de la longitud exacta de los trazados se considera la misma cantidad de ambos materiales sin tener en cuenta otras consideraciones.

* *Bloque de potencia*: Dentro del bloque de potencia se ha dado especial importancia al generador de vapor considerándolo como parte del circuito de sales y tomando como único material la superaleación HSRA INCONEL 617 debido a las condiciones agresivas de operación.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	2,4·10 ⁹
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	63,3
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	1,04·10 ⁷
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	6,76·10 ⁸
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	5,74·10 ⁶
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	3,05·10 ⁶
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	1,27·10 ⁸
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	3,61·10 ⁷
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	1,63·10 ⁷
Transformación del Suelo Natural	m ²	2,49·10 ⁵
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	2,37·10 ⁹
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	1,49·10 ⁸
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	3,69·10 ⁸

Tabla 5.16: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Planta termosolar de 19 MW_e mediante Sal Solar Binaria
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Como se observa en la tabla de caracterización, Tabla 5.16, los valores de las diferentes categorías de impacto son mucho más elevadas que en los casos expuestos con anterioridad para los materiales y las sales. La causa es que para este caso se tienen en cuenta todos los materiales y compuestos presentes en los diferentes sistemas que componen la central termosolar, es decir, anteriormente considerábamos como unidad funcional 1 kg. de sustancia y en este caso se trata de cantidades muy superiores (Toneladas) pues se trata de los totales de peso que albergan los sistemas considerados.

Se procede a la representación gráfica de normalización para los valores de las diferentes categorías de impacto obtenidas mediante la Tabla 5.16.

Para el Gráfico 5.3 se ha representado en el eje de ordenadas los valores obtenidos en la Tabla 5.17 y en el de abcisas las diferentes categorías de impacto contempladas para el estudio. En cada barra correspondiente para cada categoría se representan las cargas ambientales que aporta cada uno de los sistemas tenidos en cuenta para el estudio.

En la parte derecha del gráfico se muestra una leyenda, mediante diferentes colores, de los sistemas contemplados en el estudio.

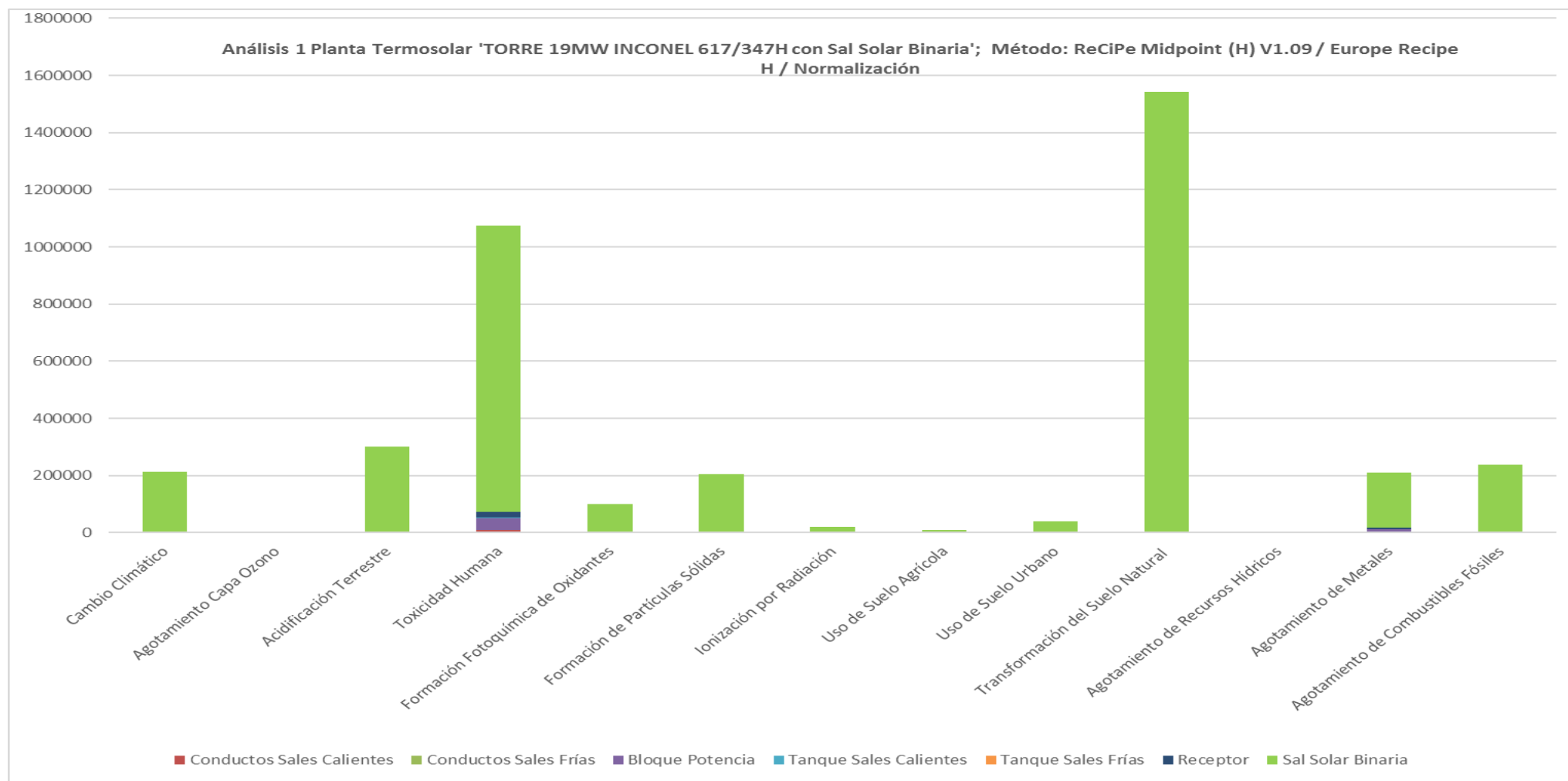


Gráfico 5.3: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 unidad de Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Mediante el Gráfico 5.3 de normalización se aprecia la enorme influencia que tiene la sal fundida, sobre el total de los sistemas considerados en la central siendo la categoría de impacto más representativa la que corresponde a la **Transformación Natural del Terreno** que casi en su totalidad es debida a la sal binaria. La siguiente categoría en importancia es la de **Toxicidad Humana** en la cual influyen más sistemas, aunque predominantemente sigue siendo la sal binaria y en mucha menor cantidad el receptor, el bloque de potencia, el tanque de sales calientes (565°C) y los conductos que transportan las sales calientes (565°C) debido a los componentes tóxicos de las aleaciones utilizadas en ellos, principalmente para la HRSA INCONEL 617 por su riqueza en Ni.

La siguiente categoría que se ve afectada, aparte de por la sal solar binaria, por los materiales del bloque de potencia, del receptor y del tanque de sales calientes (565°C), es la correspondiente al agotamiento de metales.

Para el resto de categorías de impacto con un valor considerable, como son la acidificación, la formación de partículas, el cambio climático y el agotamiento de combustibles fósiles el impacto de la sal solar binaria es predominante sobre todos los demás.

Debido a la proximidad entre las zonas de los sistemas en el gráfico, para la categoría de impacto de toxicidad humana y agotamiento de metales no se aprecian con precisión los aportes de cada uno de ellos y para conocerlos se procede a representarlos mediante la Tabla 5.17 para conocer los valores numéricos de impacto de cada uno de los sistemas sobre las categorías de impacto principales.

Etiqueta de Categoría	Sal Solar Binaria	Receptor	Tanque Sales frías (290°C)	Tanque Sales calientes (565°C)	Bloque Potencia	Conductos Sales frías (290°C)	Conductos Sales calientes (565°C)
Cambio Climático	213.482,52	42,564	17,1174	6,87	91,5325	34,9172	18,3698
Agotamiento Capa Ozono	2.868,88	1,2156	0,5579	0,1962	2,6141	1,138	0,5246
Acidificación Terrestre	296.833,05	1.226,19	138,5918	197,913	2.636,8891	282,7079	529,202
Toxicidad Humana	1.002.060,19	19.004,63	461,604	3.067,4147	40.868,633	941,6087	8.202,0003
Formación Fotoquímica de Oxidantes	100.441,61	129,87	18,924	20,9619	279,2854	38,6023	56,0503
Formación de Partículas Sólidas	201.367,51	794,98	88,2147	128,3134	1.709,5807	179,9456	343,0988
Ionización por Radiación	20.229,61	13,6203	6,9297	2,1984	29,2899	14,1356	5,8783
Uso de Suelo Agrícola	7.961,01	4,9299	1,4769	0,7957	10,6016	3,0126	2,1277
Uso de Suelo Urbano	39.835,31	66,539	6,4103	10,7397	143,0905	13,0761	28,717
Transformación del Suelo Natural	1.538.827,09	931,05	198,6504	150,276	2.002,2001	405,2189	401,8252
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0	0	0	0	0	0
Agotamiento de Metales	191.678,01	4.244,06	564,776	685,0062	9.126,6657	1152,0652	1.831,6471
Agotamiento de Combustibles Fósiles	236.791,67	76,627	31,317	12,3679	164,783	63,8825	33,0706

Tabla 5.17: Valores numéricos adimensionales contributivos de cada sistema para las diferentes categorías de impacto en normalización
Fuente: Elaboración propia mediante SimaPro 8

Como se puede apreciar en la Tabla 5.17 de valores numéricos correspondientes al diagrama de normalización, para la categoría de impacto correspondiente a la Toxicidad Humana, se aprecia que el mayor impacto es el que aporta la Sal Solar Binaria por su capacidad de formación de óxidos de nitrógeno bajo de terminadas condiciones y luego con un valor mucho menor pero considerable es el aportado por el Bloque de Potencia debido a los altos valores de Ni considerados en el sistema, al igual que el receptor pero en menor valor por aportar menos masa del metal.

Para la categoría correspondiente al Agotamiento de Metales, la mayor aportación es la correspondiente a la Sal Solar Binaria peor también son valorables las aportaciones del Receptor, Bloque de Potencia y los conductos que transportan las sales calientes (565°C), de nuevo, debido al alto contenido en Ni que presentan y para la de Agotamiento de Combustibles Fósiles es la Sal Solar Binaria la de mayor contribución.

5.3.3.2.- ACV Planta 19 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”

Para este caso se realizará la evaluación medioambiental del caso de la Planta anterior, pero con almacenamiento térmico mediante Sal Solar ternaria “Hitec” considerando los mismos datos de inventario que para el caso anterior.

Se considera como unida funcional 1p. (una planta completa) y para el inventario las cantidades de materiales y compuestos calculados para los diferentes sistemas que serán de igual masa que en el caso anterior excepto para el sistema considerado como sales fundidas cuyo peso calculado es difiere respecto de la sal binaria debido a su densidad, para la misma temperatura fijada en el caso anterior.

Sistema	AISI 347H (Tn)	INCONEL 617 (Tn)	Sal Solar Ternaria “Hitec” (Tn)
Receptor	-	12,33	-
Depósitos	58,136	61,288	-
Sales calientes (565°C)	-	-	1.612
Sales frías (290°C)	-	-	4.314
Conducciones	28,5	28,5	-
Bloque de Potencia	-	4,6	-

Tabla 5.18: Cantidades de materiales y compuestos de los sistemas de la Planta de 19 MWe considerados, para Sal Solar Ternaria “Hitec”, expresados en Toneladas.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior, los datos de la Tabla 5.18 se corresponden con los cálculos del apartado 5.3 y los aportados por el software de simulación SAM de NREL con las mismas consideraciones, pero variando el tipo de compuesto utilizado para el almacenamiento térmico.

Mediante la Tabla 5.19 de caracterización de la página siguiente, se aprecian los valores de las diferentes categorías de impacto con sus respectivas unidades observando valores más elevados que en el caso anterior para las categorías de impacto correspondientes al Agotamiento de la Capa de Ozono, Acidificación Terrestre, Formación Fotoquímica de Oxidantes y formación de Partículas. El resto de categorías de impacto tienen valores muy similares al caso anterior utilizando la Sal Solar Binaria.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	1,73·10 ⁹
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	164
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	8,97·10 ⁶
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	6,26·10 ⁸
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	5,17·10 ⁶
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	2,83·10 ⁶
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	1,47·10 ⁸
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	3,21·10 ⁷
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	1,63·10 ⁷
Transformación del Suelo Natural	m ²	2,17·10 ⁵
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	2,81·10 ⁹
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	1,25·10 ⁸
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	3,55·10 ⁸

Tabla 5.19: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante sal solar ternaria “Hitec”

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Efectuando la representación gráfica para la normalización, se obtiene el Gráfico

5.4.

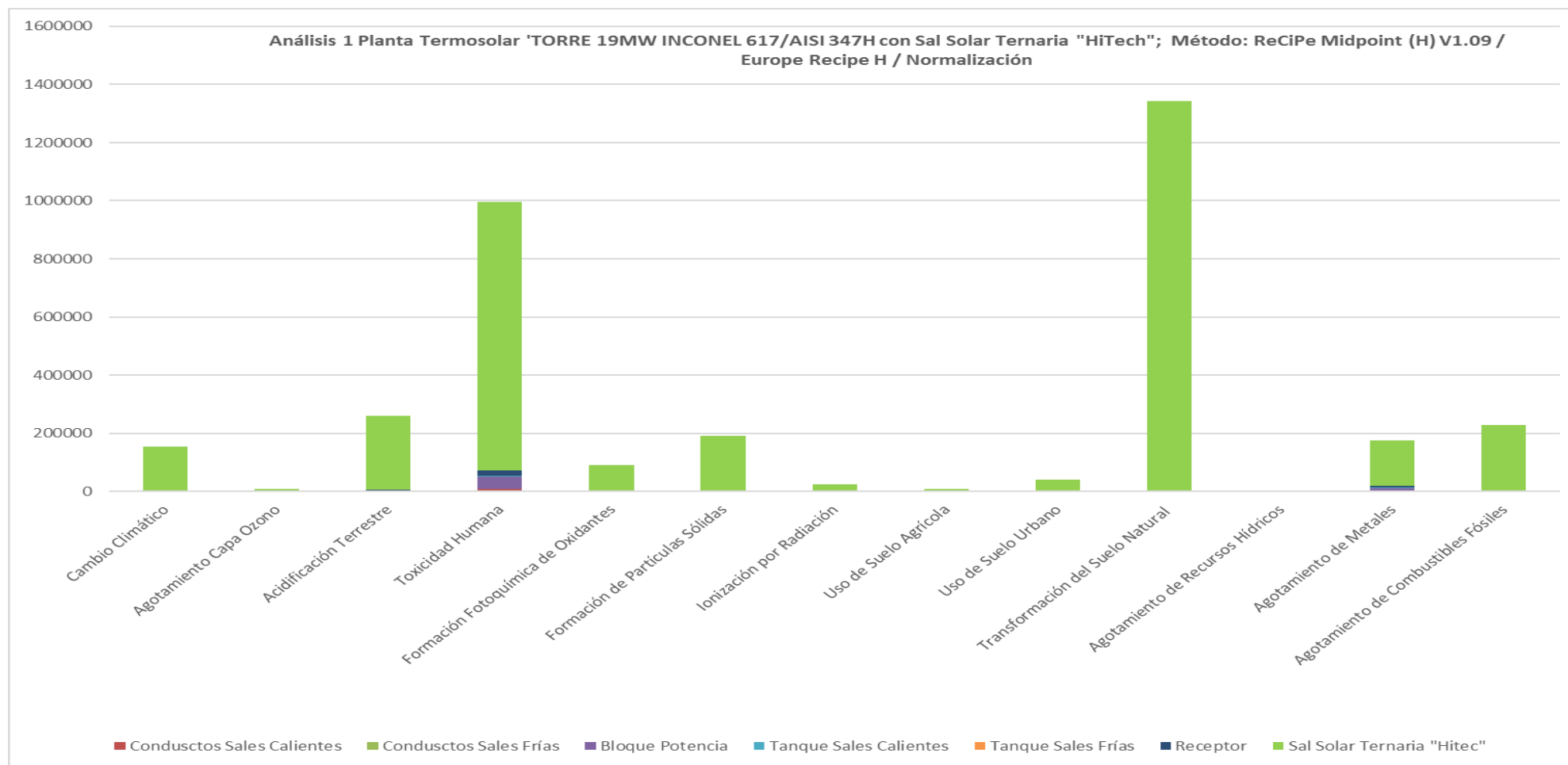


Gráfico 5.4: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 unidad de Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria "HiTec" con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0.

Como se aprecia en el Gráfico 5.4 de normalización, las categorías de impacto que se ven más afectadas son las correspondientes a la Transformación Natural de la Tierra y la Toxicidad Humana y para ellas, la mayor aportación corresponde al sistema del compuesto sales fundidas. Dentro de ellas, aparecen con aportación de carga ambiental, aunque e mucha menor medida, los sistemas que corresponden al receptor, bloque de potencia, los conductos de sales calientes (565°C) y el tanque de sales calientes (565°C) para la toxicidad humana. En la categoría correspondiente a la transformación natural del terreno también influyen, pero en mucha menor medida al igual que en el resto de categorías que aportan algo de carga medioambiental.

Para apreciar de forma más clara las aportaciones de los diferentes sistemas a las categorías de impacto, veamos los valores numéricos para cada uno de ellos mediante la Tabla 5.18. de la página siguiente.

Etiqueta de Categoría	Sal Solar Ternaria Hitec	Receptor	Tanque Sales frías (290°C)	Tanque Sales calientes (565°C)	Bloque Potencia	Conductos Sales frías (290°C)	Conductos Sales calientes (565°C)
Cambio Climático	154.041,9833	42,5642	17,1174	6,87	91,5205	34,9172	18,3698
Agotamiento Capa Ozono	7.444,8683	1,2156	0,5579	0,1962	2,6138	1,138	0,5246
Acidificación Terrestre	255.979,0779	1.226,199	138,5918	197,913	2.636,545	282,7079	529,202
Toxicidad Humana	923.475,3964	19.004,63	461,6047	3.067,4147	40.863,2988	941,6087	8.202,0002
Formación Fotoquímica de Oxidantes	90.472,0684	129,8726	18,924	20,9619	279,2489	38,6023	56,0503
Formación de Partículas Sólidas	186.750,523	794,9851	88,2147	128,3134	1.709,3575	179,9456	343,0988
Ionización por Radiación	23.462,5885	13,6203	6,9297	2,1984	29,2861	14,1356	5,8783
Uso de Suelo Agrícola	7.066,9555	4,9299	1,4769	0,7957	10,6002	3,0126	2,1277
Uso de Suelo Urbano	39.768,6876	66,5396	6,4103	10,7397	143,0718	13,0761	28,717
Transformación del Suelo Natural	1.337.662,26	931,0583	198,6504	150,276	2.001,9388	405,2189	401,8252
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0	0	0	0	0	0
Agotamiento de Metales	157.402,5781	4.244,060	564,7767	685,0062	9.125,4743	1.152,0652	1.831,6471
Agotamiento de Combustibles Fósiles	227.883,8626	76,627	31,317	12,3679	164,7615	63,8825	33,0706

Tabla 5.18: Valores numéricos adimensionales contributivos de cada sistema para las diferentes categorías de impacto en normalización
Fuente: Elaboración propia mediante SimaPro 8

Mediante la Tabla 5.18 para los valores numéricos correspondientes a la categoría de impacto de Transformación Natural del Terreno se aprecia que la mayor contribución a ella es, principalmente, la correspondiente al sistema de compuesto Sal Solar Ternaria “Hitec” y en mucha menor contribución el sistema Bloque de Potencia y Receptor.

La segunda categoría de impacto más afectada es la de Toxicidad Humana para la cual las mayores contribuciones corresponden por este orden los sistemas Sal Solar Ternaria “Hitec”, Bloque de Potencia, Receptor y Conductos de Sales calientes (565°C).

La tercera categoría de impacto que aporta un valor considerable es la correspondiente a la Acidificación Terrestre siendo de nuevo el sistema con mayor contribución el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” seguido del Bloque de Potencia y a continuación el Receptor.

Para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles, la principal contribución corresponde al sistema de compuesto de Sal Solar Ternaria “Hitec”.

Para el resto de categorías la principal contribución corresponde al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” excepto para la categoría correspondiente al Agotamiento de Metales en la que existe alguna aportación por parte del Receptor, Bloque de Potencia y Conductos de Sales calientes (565°C).

5.3.3.3.- ACV Planta 100 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Binaria

En este apartado se va a considerar la evaluación medioambiental de una Planta Termosolar de 100 MW_e de potencia con almacenamiento térmico con sales fundidas del tipo Sal Solar Binaria mediante un ACV tomando como datos de inventario los obtenidos el apartado 5.3 correspondientes a este tipo de central.

Para este estudio se ha elegido como unidad funcional 1p. (una planta completa) y como datos de inventario las cantidades de materiales y compuestos obtenidos para los diferentes sistemas de esta central que se resumen en la siguiente Tabla 5.19.

Sistema	AISI 347H (Tn)	INCONEL 617 (Tn)	Sal Solar Binaria (Tn)
Receptor	-	44	-
Depósitos	178,779	188,467	-
Sales calientes (565°C)	-	-	8.000
Sales frías (290°C)	-	-	22.527
Conducciones	50	67	-
Bloque de Potencia	-	254	-

Tabla 5.19: Cantidades de materiales y compuestos de los sistemas de la Planta de 100 MW_e con almacenamiento térmico de Sal Solar Binaria, expresados en Toneladas.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos aportados en la Tabla 5.19 corresponden a los cálculos realizados en el apartado 5.3 a partir de los resultados obtenidos con el programa informático SAM de NREL y mediante revisión bibliográfica²²⁵.

Las consideraciones que se han tenido en cuenta para este estudio son las mismas que para el caso de anterior de una central termosolar de 19 MW_e, pero con las cantidades correspondientes de materiales y compuestos propios para la central considerada de 100 MW_e.

Mediante el ACV realizado para este caso se obtiene la Tabla 5.20 de caracterización de las diferentes categorías de impacto con la aportación de los diferentes sistemas involucrados en el estudio.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	1,22·10 ¹⁰
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 equiv	324
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	5,3·10 ⁷
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB equiv	3,46·10 ⁹
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	2,93·10 ⁷
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 equiv	1,56·10 ⁷
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ equiv	6,48·10 ⁸
Uso de Suelo Agrícola	m ² area	1,85·10 ⁸
Uso de Suelo Urbano	m ² area	8,33·10 ⁷
Transformación del Suelo Natural	m ²	1,27·10 ⁶
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	1,21·10 ¹⁰
Agotamiento de Metales	kg.Fe equiv	7,62·10 ⁸
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil equiv	1,88·10 ⁹

Tabla 5.20: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

²²⁵ Turchi C., Kurup P., Akar S., and Flores F. " Domestic Material Content in Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants". Technical Report NREL/TP-5500-64429, August 2015.

Mediante la representación de la Gráfica 5.5 correspondiente a la Normalización, se obtiene las contribuciones de las diferentes categorías de impacto para este sistema de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante sal solar binaria.

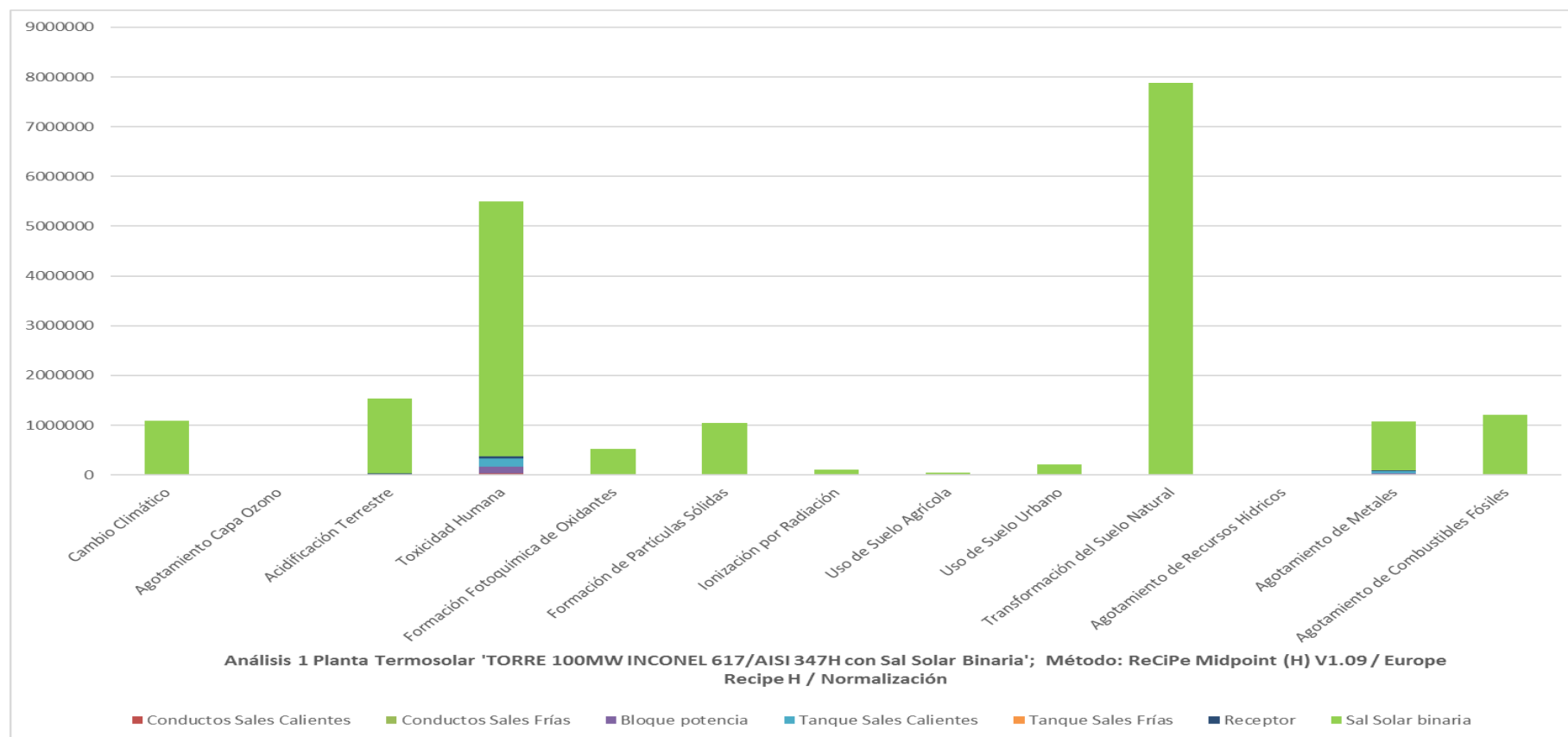


Gráfico 5.5: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 unidad de Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0

Mediante el gráfico superior se aprecia que la mayor contribución corresponde a la categoría de Transformación Natural de la Tierra en la que la mayor carga ambiental es debida al sistema sal solar binaria, al igual que para la categoría de Toxicidad Humana, aunque para esta, la incidencia de otros sistemas si aparecen con determinado valor, aunque muy inferior al aportado por la sal solar binaria.

Para precisar más sobre la contribución de las diferentes categorías de impacto que figuran en la gráfica de normalización, se aporta la Tabla 5.21 correspondiente a los valores numéricos adimensionales, de contribución de cada categoría y que se analiza debajo de ella.

Se han marcado en diferentes colores los valores que aportan mayor carga ambiental sobre las diferentes categorías de impacto en la Tabla 5.21 representada en la página siguiente.

Etiqueta de Categoría	Sal Solar Binaria	Receptor	Tanque Sales frías (290°C)	Tanque Sales calientes (565°C)	Bloque Potencia	Conductos Sales frías (290°C)	Conductos Sales calientes (565°C)
Cambio Climático	1.091.073,3395	100,0633	30,0306	379,3443	281,472	107,3768	65,7132
Agotamiento Capa Ozono	14.662,4045	2,8578	0,9788	10,834	8,0387	3,4998	1,8767
Acidificación Terrestre	1.517.063,8742	2.882,6454	243,1435	10.928,2379	8.108,7095	869,3792	1.893,0806
Toxicidad Humana	5.121.361,4033	44.677,562	809,8327	169.374,6396	125.675,315	2.895,6217	29.340,4887
Formación Fotoquímica de Oxidantes	513.340,232	305,3146	33,2	1.157,4613	858,8317	118,7093	200,505
Formación de Partículas Sólidas	1.029.155,5334	1.868,9124	154,7626	7.085,1307	5.257,139	553,366	1.227,3455
Ionización por Radiación	103.390,1895	32,0197	12,1574	121,3883	90,0696	43,4697	21,0279
Uso de Suelo Agrícola	40.687,4222	11,5897	2,591	43,937	32,6011	9,2645	7,6111
Uso de Suelo Urbano	203.591,5851	156,4264	11,2462	593,0195	440,0182	40,2115	102,7278
Transformación del Suelo Natural	7.864.686,9029	2.188,8038	348,5095	8.297,8533	6.156,9745	1.246,1235	1.437,4234
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0	0	0	0	0	0
Agotamiento de Metales	979.634,143	9.977,2647	990,8363	37.824,2572	28.065,4499	3.542,8144	6.552,2335
Agotamiento de Combustibles Fósiles	1.210.202,5055	180,1406	54,9422	682,9213	506,7249	196,4504	118,3013

Tabla 5.21: Valores numéricos adimensionales contributivos de cada sistema para las diferentes categorías de impacto en normalización
Fuente: Elaboración propia mediante SimaPro 8

Como se explicó anteriormente, la categoría de Transformación Natural de la Tierra se debe al uso, mediante ocupación, y conversión, mediante transformación, de una superficie de tierra, por actividades varias como pueden ser agrícolas, infraestructuras, minería etc. y considerará los efectos provocados por su uso, la extensión superficial utilizada y la duración de este uso. Esta categoría tiene en cuenta la amplitud de los cambios en la propiedad de la tierra.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.21, el valor más elevado de esta categoría corresponde al sistema sal solar binaria seguido, a bastante distancia, por el sistema de tanque de sales calientes (565°C) (por su alta composición en Ni) y bloque de potencia y receptor por la misma causa. La importancia del Ni en esta categoría de impacto se debe a que gran parte, se obtiene a partir de la laterita, mineral rico en sulfuro de este metal y a partir del cual se obtiene el Ni metálico.

En lo que se refiere a la categoría de impacto Toxicidad Humana, el mayor valor corresponde nuevamente al sistema sal solar binaria por el motivo visto con anterioridad y que tenía que ver con la formación de diferentes tipos de óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles. El siguiente valor a tener en cuenta es la contribución del tanque de sales calientes (565°C) y el bloque de potencia debido a la toxicidad del Ni, predominantemente presente en ambos sistemas.

Para el resto de categorías, las principales contribuciones a ellas son debidas al sistema sal solar binaria por su carga ambiental contributivo al cambio climático, acidificación terrestre, formación de partículas sólidas, agotamiento de metales y agotamiento de combustibles fósiles. Para las categorías correspondientes a la Acidificación y al agotamiento de metales, adquieren determinado valor los sistemas correspondientes a los tanques de sales calientes (565°C) y el bloque de potencia por su alto contenido en Ni.

5.3.3.4.- ACV Planta 100 MWe con almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”

A continuación, se procede a la evaluación de la misma planta de 100 MWe del caso anterior, pero mediante almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”. Para este caso, se ha considerado la misma cantidad y tipo de materiales, pero la diferencia se encuentra en el tipo de compuesto, que para este caso se trata de la sal solar ternaria comentada anteriormente en cantidades que difieren ligeramente del mismo caso anterior con sal solar binaria.

Sistema	AISI 347H (Tn)	INCONEL 617 (Tn)	Sal Solar Ternaria “Hitec” (Tn)
Receptor	-	44	-
Depósitos	178,779	188,467	-
Sales calientes (565°C)	-	-	8.486
Sales frías (290°C)	-	-	22.705
Conducciones	50	67	-
Bloque de Potencia	-	254	-

Tabla 5.22: Cantidades de materiales y compuestos de los sistemas de la Planta de 100 MWe con almacenamiento térmico de Sal Solar Ternaria “Hitec”, expresados en Toneladas.

Fuente: Elaboración propia

Tomando como datos de inventario los correspondientes a la tabla anterior (Tabla 5.22), mediante el ACV simulado en la herramienta SimaPro 8, se obtuvo la tabla de datos de caracterización para las diferentes categorías de impacto seleccionadas y coincidentes con las tenidas en cuenta en los casos anteriores, y que se reflejan con sus respectivas unidades en la tabla de la página siguiente (Tabla 5.23), considerándose los valores totales mediante la suma de las contribuciones de cada uno de los sistemas para la categoría de impacto considerada.

Categoría de impacto	Unidades	Total
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	8,9·10 ⁹
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	845
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	4,6·10 ⁷
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	3,19·10 ⁹
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	2,66·10 ⁷
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	1,45·10 ⁷
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	7,57·10 ⁸
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	1,65·10 ⁸
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	8,37·10 ⁷
Transformación del Suelo Natural	m ²	1,12·10 ⁶
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	1,44·10 ¹⁰
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	6,31·10 ⁸
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	1,83·10 ⁹

Tabla 5.23: Tabla de caracterización correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Si se comparan estos valores con los obtenidos en el caso anterior de la misma planta de 100 MWe, pero con la Sal Solar Binaria, se observa una variación de las categorías de impacto, entre una y otra, en algunos casos considerables.

Para observar de forma gráfica los valores obtenidos en la Tabla 5.23, se realiza el Gráfico 5.6 correspondiente a la normalización de los datos.

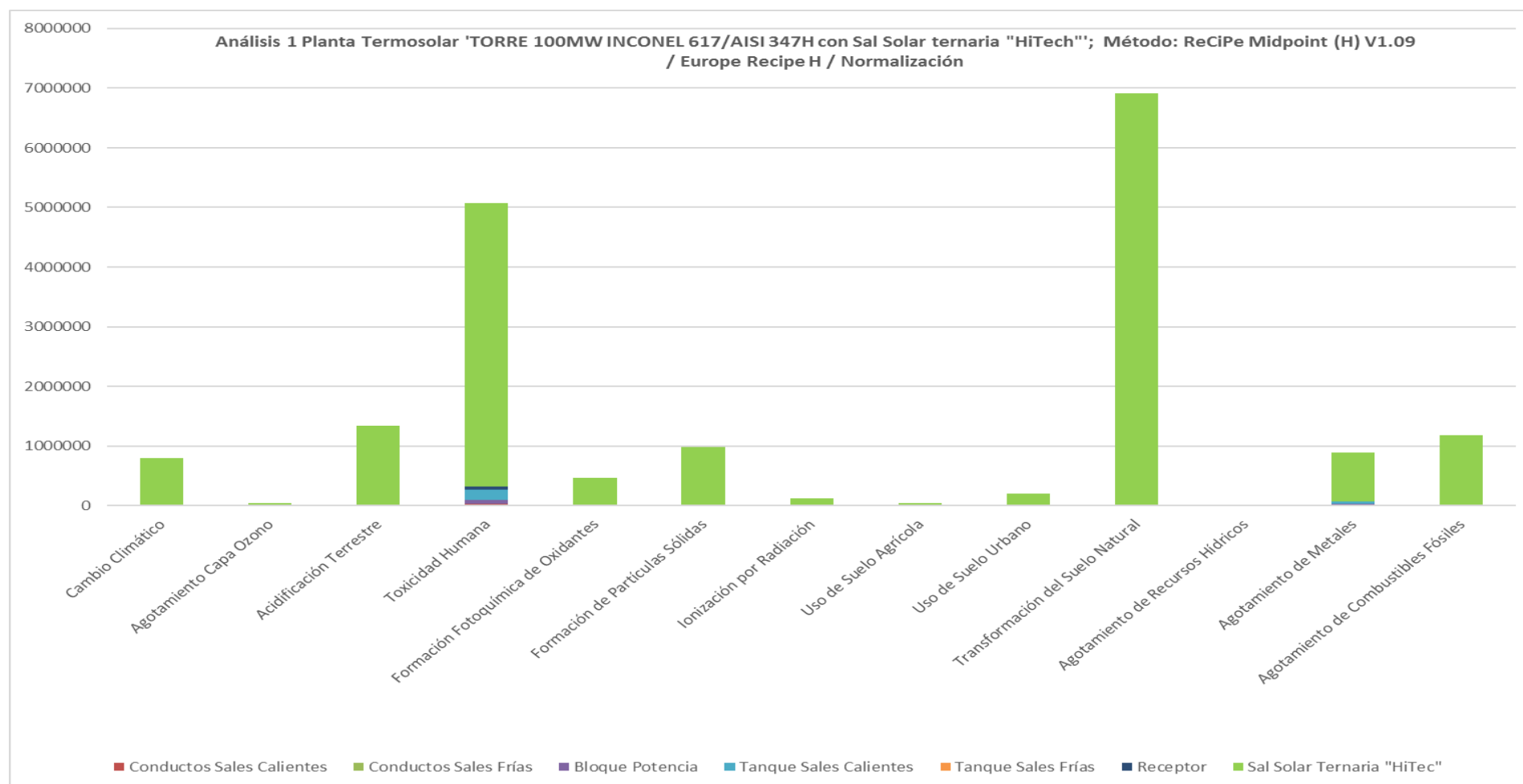


Gráfico 5.6: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 unidad de Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec” con las diferentes categorías de impacto.
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.0.

Mediante el Gráfico 5.6 se observa que las categorías de impacto que aportan mayor contribución son las correspondientes a la Transformación Natural del Terreno y la Toxicidad Humana siendo la mayor contribución para la primera, el sistema de sales fundidas y para la segunda, también aportan carga ambiental los sistemas correspondientes al tanque de sales calientes (565°C), bloque de potencia y receptor.

La Tabla 5.24 de la página siguiente, nos permite observar con mayor precisión los valores de carga ambiental para cada categoría de impacto en cada caso de los diferentes sistemas involucrados en la planta termosolar.

Etiqueta de Categoría	Sal Solar Ternaria Hitec	Receptor	Tanque Sales frías (290°C)	Tanque Sales calientes (565°C)	Bloque Potencia	Conductos Sales frías (290°C)	Conductos Sales calientes (565°C)
Cambio Climático	793.526,7673	100,0633	30,0306	379,3443	154,5753	58,98	65,7132
Agotamiento Capa Ozono	38.351,2479	2,8578	0,9788	10,834	4,4146	1,9224	1,8767
Acidificación Terrestre	1.318.642,1383	2.882,6454	243,1436	10.928,2379	4.453,0418	477,5339	1.893,0806
Toxicidad Humana	4.757.160,5513	44.677,562	809,8327	169.374,6391	69.016,831	1.590,5115	29.340,4887
Formación Fotoquímica de Oxidantes	466.054,8145	305,3146	33,2	1.157,4613	471,6427	65,2048	200,505
Formación de Partículas Sólidas	962.020,455	1.868,9124	154,7626	7.085,1307	2.887,0513	303,9538	1.227,3455
Ionización por Radiación	120.864,4006	32,0197	12,1574	121,3883	49,4633	23,8771	21,0279
Uso de Suelo Agrícola	36.404,4802	11,5897	2,591	43,937	17,9035	5,0888	7,6111
Uso de Suelo Urbano	204.863,099	156,4264	11,2462	593,0195	241,6438	22,0875	102,7278
Transformación del Suelo Natural	6.890.789,0787	2.188,8038	348,5095	8.297,8533	3.381,2119	684,4726	1.437,4234
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0	0	0	0	0	0
Agotamiento de Metales	810.838,4244	9.977,2647	990,8363	37.824,2573	15.412,640 3	1.946,0025	6.552,2335
Agotamiento de Combustibles Fósiles	1.173.913,377	180,1406	54,9422	682,9213	278,277	107,9066	118,3013

Tabla 5.24: Valores numéricos adimensionales contributivos de cada sistema para las diferentes categorías de impacto en normalización

Fuente: Elaboración propia mediante SimaPro 8

En la Tabla 5.24, se observa que, para la categoría de impacto correspondiente a la **Transformación Natural de la Tierra**, la mayor aportación corresponde al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” seguido por el sistema de Tanque de sales calientes (565°C), bloque de potencia y receptor.

Para la siguiente categoría de impacto más afectada, la de la **Toxicidad Humana**, la mayor carga corresponde al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”, seguido por el sistema de sales calientes (565°C). El resto de sistemas que aportan determinada carga ambiental son el tanque de sales calientes (565°C), el bloque de potencia, el receptor y los conductos de sales calientes (565°C).

Para la categoría de **Acidificación**, los sistemas más contributivos para esta categoría de impacto son, por este orden, el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”, Tanque de sales calientes (565°C), bloque de potencia y receptor.

Para la categoría de **Agotamiento de Combustibles Fósiles**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”.

La categoría de impacto correspondiente a **Cambio Climático**, se ve influenciada, principalmente, por el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”. El resto de aportaciones son prácticamente despreciables.

5.3.4.- Evaluación medioambiental comparativa de cada configuración

Mediante el presente apartado se procederá a realizar la evaluación medioambiental comparativa de las dos tecnologías de receptor central de torre de diferente potencia consideradas en esta tesis. Para ello se efectuará un ACV comparativo de cada potencia con diferente compuesto de almacenamiento térmico (Sal Solar Binaria y Sal Solar Ternaria “Hitec”) con la intención de saber cuál de las diferentes categorías de impacto, seleccionadas para el análisis, son las más afectadas y de ellas los sistemas de la planta que aportan un mayor impacto en cuanto a la carga medioambiental.

Al igual que en casos anteriores, la aplicación del proceso completo se efectuará mediante el método de evaluación de impacto ReCiPe, utilizando como base de datos Ecoinvent 3.0 a partir de la cual se obtendrán los datos de inventario necesarios, ajustado a las configuraciones seleccionadas.

El Análisis de Ciclo de Vida a realizar determinará cuál de los dos compuestos para almacenamiento térmico es más respetuoso con el medio ambiente de cara a su uso en futuras aplicaciones teniendo presente que no se ha tenido en cuenta el factor económico, sólo el medioambiental.

Como se ha visto en los ACV realizados en apartados anteriores, la mayor carga ambiental corresponde al sistema de sales fundidas como almacenamiento térmico y por este motivo se realiza el análisis comparativo para tecnologías de la misma potencia y considerando los mismos materiales estudiados anteriormente, para la misma configuración lo cual permite mantener constantes las mismas cantidades de materiales y que dependa el análisis solamente de los compuestos seleccionados para el almacenamiento térmico.

5.3.4.1.- Evaluación medioambiental comparativa entre Plantas de 19 MWe

Como continuación del apartado anterior, se procede a efectuar la evaluación medioambiental comparativo de las dos Plantas Termosolares de 19 MWe de potencia con los dos tipos de compuestos para el almacenamiento térmico seleccionados. La cantidad de sal solar seleccionada ha sido la calculada para lograr un período de funcionamiento de 15 horas en continuo y en ausencia de radiación solar.

El método seleccionado ha sido ReCiPe, como en los anteriores casos, Midpoint y bajo una perspectiva social Jerárquica (H). La perspectiva Jerárquica (Hierarchist) busca el consenso, y toma el marco de tiempo a 100 años, que es el más usado ya que es al que se hace referencia en las normas ISO sobre ACV (ISO 14044:2006). Por ello es la perspectiva más aceptada por la comunidad científica²²⁶.

El inventario empleado ha sido extraído de los ACV de los casos anteriores, obteniendo como resultado la suma de los efectos de emisiones y recursos derivados de los diferentes materiales y compuestos involucrados en las Plantas objeto de estudio. Los efectos mencionados se corresponden con los resultados medioambientales de las diferentes categorías de impacto consideradas tomando como emisiones las que

²²⁶ Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. and van Zelm R. ReCiPe 2008. "A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonized Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level", 2009.

aparecieran en los diferentes estados de agregación.

Los resultados obtenidos han sido extraídos de la base de datos Ecoinvent 3.0 para los materiales y compuestos considerados y ampliados en los casos en que no han existido alguno de los elementos de la composición de ellos que no figuraran en dicha base.

Mediante la Tabla 40, de la siguiente página, correspondiente a la caracterización, se pueden observar los diferentes valores obtenidos de las diferentes categorías de impacto involucradas en el análisis. De ellas, y dada su implicación medioambiental, se muestran las emisiones gaseosas que aportan las diferentes categorías de impacto siendo las más significativas las correspondientes al CO₂, óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y las debidas a los compuestos orgánicos volátiles distintos del CH₄.

Las emisiones de CO₂ se consideran como de las más importantes por su contribución al efecto invernadero o calentamiento global siendo la referencia en la evaluación medioambiental y a través de ella se establecerán comparaciones entre las diferentes configuraciones estudiadas en apartados anteriores. El cálculo efectuado para las emisiones de CO₂ en la categoría de cambio climático es el de emisiones propias y el CO_{equivalente} de forma que se agrupa el efecto equivalente provocado por los otros gases responsables del efecto invernadero como pudiera ser el CH₄, NO, SF₆ y los diferentes compuestos fluorocarbonados.

Las emisiones de SO_x se han tenido en cuenta mediante la categoría de impacto correspondiente a la Acidificación Terrestre y son los principales responsables de la lluvia ácida que sucede por la reacción de los compuestos de azufre y nitrógeno con diferentes sustancias presentes en la atmósfera y que son transportados por diferentes medios depositándose en el terreno mediante lo que se conoce como lluvia ácida o por la formación de gases o polvos²²⁷.

²²⁷ Environmental Protection Agency. EPA -U.S. “*Life Cycle Assessment: Principles and Practice*”, Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006.

Categoría de impacto	Unidades	Total Sal Solar Binaria	Total Sal Solar Ternaria "Hitec"
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	$2,4 \cdot 10^9$	$1,73 \cdot 10^9$
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 equiv	63,3	164
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	$1,04 \cdot 10^7$	$8,97 \cdot 10^6$
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB equiv	$6,76 \cdot 10^8$	$6,26 \cdot 10^8$
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	$5,74 \cdot 10^6$	$5,17 \cdot 10^6$
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 equiv	$3,05 \cdot 10^6$	$2,83 \cdot 10^6$
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ equiv	$1,27 \cdot 10^8$	$1,47 \cdot 10^8$
Uso de Suelo Agrícola	m ² area	$3,61 \cdot 10^7$	$3,21 \cdot 10^7$
Uso de Suelo Urbano	m ² area	$1,63 \cdot 10^7$	$1,63 \cdot 10^7$
Transformación del Suelo Natural	m ²	$2,49 \cdot 10^5$	$2,17 \cdot 10^5$
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	$2,37 \cdot 10^9$	$2,81 \cdot 10^9$
Agotamiento de Metales	kg.Fe equiv	$1,49 \cdot 10^8$	$1,25 \cdot 10^8$
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil equiv	$3,69 \cdot 10^8$	$3,55 \cdot 10^8$

Tabla 5.25: Tabla de caracterización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y Sal Solar Ternaria "Hitec"
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Los diferentes óxidos de nitrógeno son los responsables de la niebla fotoquímica que es uno de los responsables del agotamiento de la capa de ozono y de la lluvia ácida y se encuentra incorporado en el grupo de los CFC en la categoría de impacto de Agotamiento de la capa de Ozono.

La categoría de Formación Fotoquímica de Oxidantes incluye los hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, derivados de halógenos y diversos compuestos orgánicos muy peligrosos para la salud humana dependiendo de la composición que presenten que al mezclarse con contaminantes como pueden ser los óxidos de nitrógeno, reaccionando entre ellos y formando ozono bajo, muy tóxico.

De la Tabla 5.25, se observa que el valor de la categoría de impacto correspondiente al **Agotamiento de la Capa de Ozono** en kg.CFC-11_{equiv} es más favorable para la Planta que utiliza como compuesto de almacenamiento térmico la Sal Solar Ternaria "Hitec".

Para la categoría correspondiente a la **Acidificación Terrestre**, medido en kg.SO₂ equiv, se observa un valor más elevado para el sistema que utiliza la Sal Solar Binaria por lo que resultará más favorable, en este caso, el empleo de la Sal Solar Ternaria "Hitec".

Para el resto de valores de las diferentes categorías de impacto, las diferencias entre ellos no son tan apreciable como ocurre en los dos anteriores.

Presentando el Gráfico 5.7 correspondiente a la normalización de los resultados se obtiene la evaluación de las categorías de daño mediante las categorías de impacto con mayor carga ambiental siendo las más representativas las de la Transformación Natural del terreno y a la Toxicidad Humana.

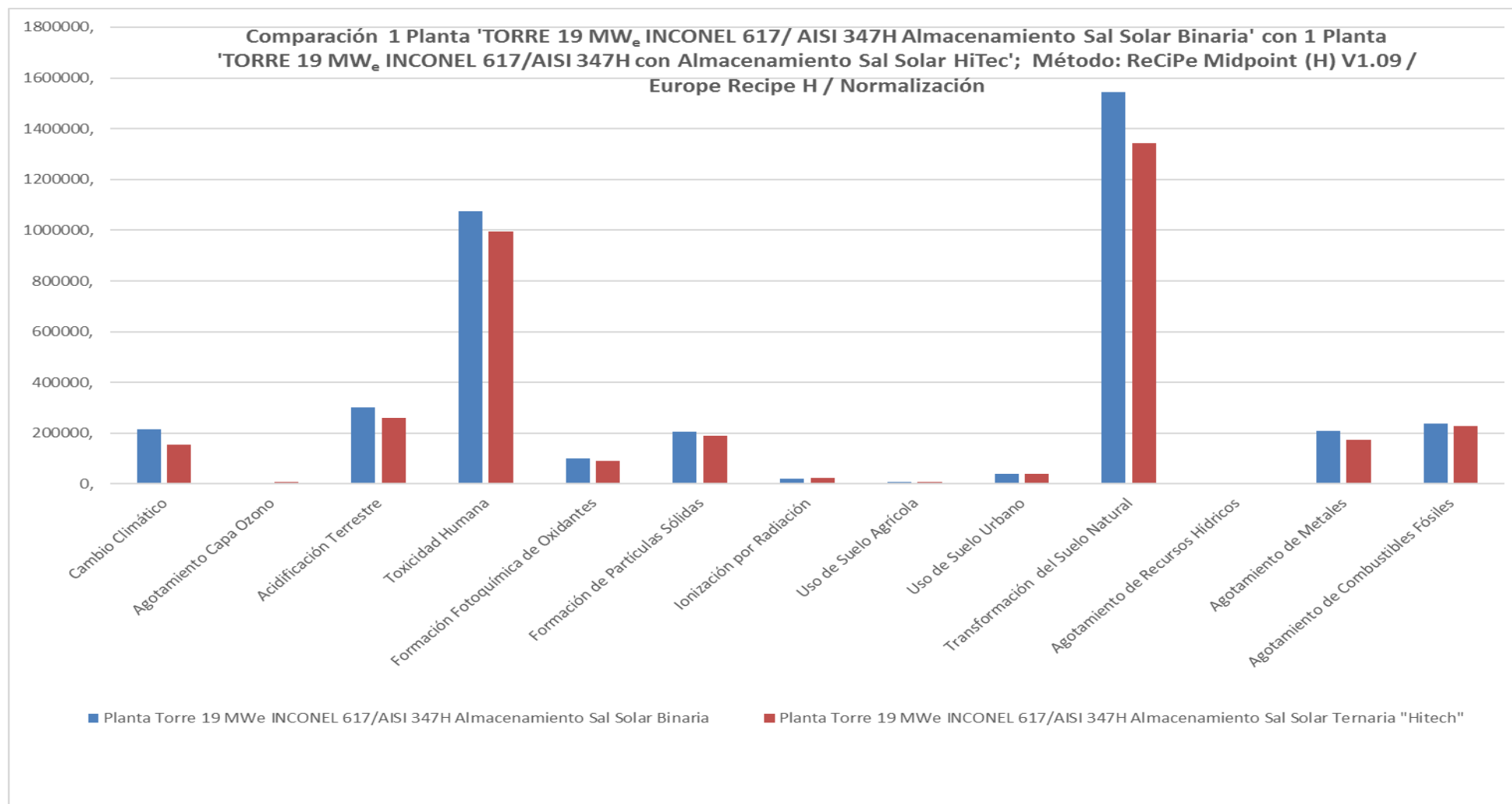


Gráfico 5.7: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y 1 Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec” con las diferentes categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.

Como se explicó anteriormente, el proceso de normalización provoca la conversión de la unidad correspondiente de categoría de daño de manear que permite la comparación entre las dos Plantas en base a cada categoría de daño.

A mayor distancia, las categorías de impacto que arrojan menor contribución son las de Acidificación Terrestre, Agotamiento de combustibles Fósiles, Formación de Partículas, Agotamiento de Metales y Cambio Climático.

La representación de los valores del eje de ordenadas para el gráfico de normalización, se realiza a partir de los que aporta la Tabla 5.26 de la parte inferior.

Etiqueta de Categoría	Planta 19 MW _e con Sal Solar Binaria	Planta 19 MW _e con Sal Solar Ternaria “Hitec”
Cambio Climático	213.693,8967	154.253,3425
Agotamiento Capa Ozono	2.875,1346	7.451,1146
Acidificación Terrestre	301.844,5539	260.990,2375
Toxicidad Humana	1.074.606,0967	996.015,9583
Formación Fotoquímica de Oxidantes	100.985,3123	91.015,7284
Formación de Partículas Sólidas	204.611,649	189.994,4382
Ionización por Radiación	20.301,672	23.534,6369
Uso de Suelo Agrícola	7.983,9617	7.089,8986
Uso de Suelo Urbano	40.103,8843	40.037,2422
Transformación del Suelo Natural	1.542.916,3288	1.341.751,2366
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0
Agotamiento de Metales	209.282,2352	175.005,6081
Agotamiento de Combustibles Fósiles	237.173,7263	228.265,889

Tabla 5.26: Tabla de normalización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y Sal Solar Ternaria “Hitec”
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Como puede observarse a partir de los datos numéricos aportados en la Tabla 5.26, los valores más elevados corresponden a las categorías de Transformación Natural de la Tierra y a la Toxicidad Humana siendo superiores los pertenecientes a la Planta que utiliza como compuesto de almacenamiento térmico la Sal Solar Binaria.

De todas las categorías de impacto, las únicas que son desfavorables para el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”, son las correspondientes al Agotamiento de la capa de Ozono y a la Radiación por Ionización.

5.3.4.2.- Evaluación medioambiental comparativa entre Plantas de 100 MWe

En este apartado se va a realizar la evaluación medioambiental comparativo entre Plantas de 100 MWe utilizando compuestos de almacenamiento térmico diferentes, al igual que se hizo para la Planta de 19 MWe. Al igual que en el caso anterior la cantidad de sal solar que se ha tenido en cuenta ha sido la calculada para un período de funcionamiento de 15 horas en continuo y en ausencia de radiación solar.

El inventario que se ha tenido en cuenta se ha incorporado a partir de los casos anteriores resultando la suma de los efectos de las emisiones y recursos derivados de los diferentes materiales y compuestos considerados en los ACV anteriores para la potencia de la misma tecnología y utilizando la base de datos aportada por el programa informático que es la misma para todos los casos analizados hasta el momento.

A partir de la Tabla 5.27 correspondiente a la caracterización se aprecian los diferentes valores obtenidos para cada categoría de impacto.

Categoría de impacto	Unidades	Total Sal Solar Binaria	Total Sal Solar Ternaria "Hitec"
Cambio Climático	kg.CO ₂ equiv	$1,22 \cdot 10^{10}$	$8,9 \cdot 10^9$
Agotamiento Capa Ozono	kg.CFC-11 _{equiv}	324	845
Acidificación Terrestre	kg.SO ₂ equiv	$5,3 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$
Toxicidad Humana	kg.1,4-DB _{equiv}	$3,46 \cdot 10^9$	$3,19 \cdot 10^9$
Formación Fotoquímica de Oxidantes	kg. NMVOC	$2,93 \cdot 10^7$	$2,66 \cdot 10^7$
Formación de Partículas Sólidas	kg.PM10 _{equiv}	$1,56 \cdot 10^7$	$1,45 \cdot 10^7$
Ionización por Radiación	kBq U ²³⁵ _{equiv}	$6,48 \cdot 10^8$	$7,57 \cdot 10^8$
Uso de Suelo Agrícola	m ² _{area}	$1,85 \cdot 10^8$	$1,65 \cdot 10^8$
Uso de Suelo Urbano	m ² _{area}	$8,33 \cdot 10^7$	$8,37 \cdot 10^7$
Transformación del Suelo Natural	m ²	$1,27 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^6$
Agotamiento de Recursos Hídricos	m ³	$1,21 \cdot 10^{10}$	$1,44 \cdot 10^{10}$
Agotamiento de Metales	kg.Fe _{equiv}	$7,62 \cdot 10^8$	$6,31 \cdot 10^8$
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg.Oil _{equiv}	$1,88 \cdot 10^9$	$1,83 \cdot 10^9$

Tabla 5.27: Tabla de caracterización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y Sal Solar Ternaria "Hitec"
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.

Los valores más elevados para las diferentes categorías de impacto corresponden

a las categorías de Cambio Climático y Agotamiento de Recursos Hídricos.

Los valores con mayor contribución son los correspondientes a la categoría de impacto Cambio Climático con mayor carga ambiental para la Planta que opera mediante el sistema de almacenamiento térmico de Sal Solar Binaria.

De todas las categorías de impacto, en general, la mayor carga ambiental corresponde a la Planta que opera mediante Sal Solar Binaria excepto en los casos del Agotamiento de la Capa de Ozono, en la que se aprecia gran diferencia entre ambos siendo mayor la contribución de la Planta que opera mediante Sal Solar Ternaria “Hitec” y la Ionización por Radiación junto con el Agotamiento de Recursos Hídricos en los que también es ligeramente superior.

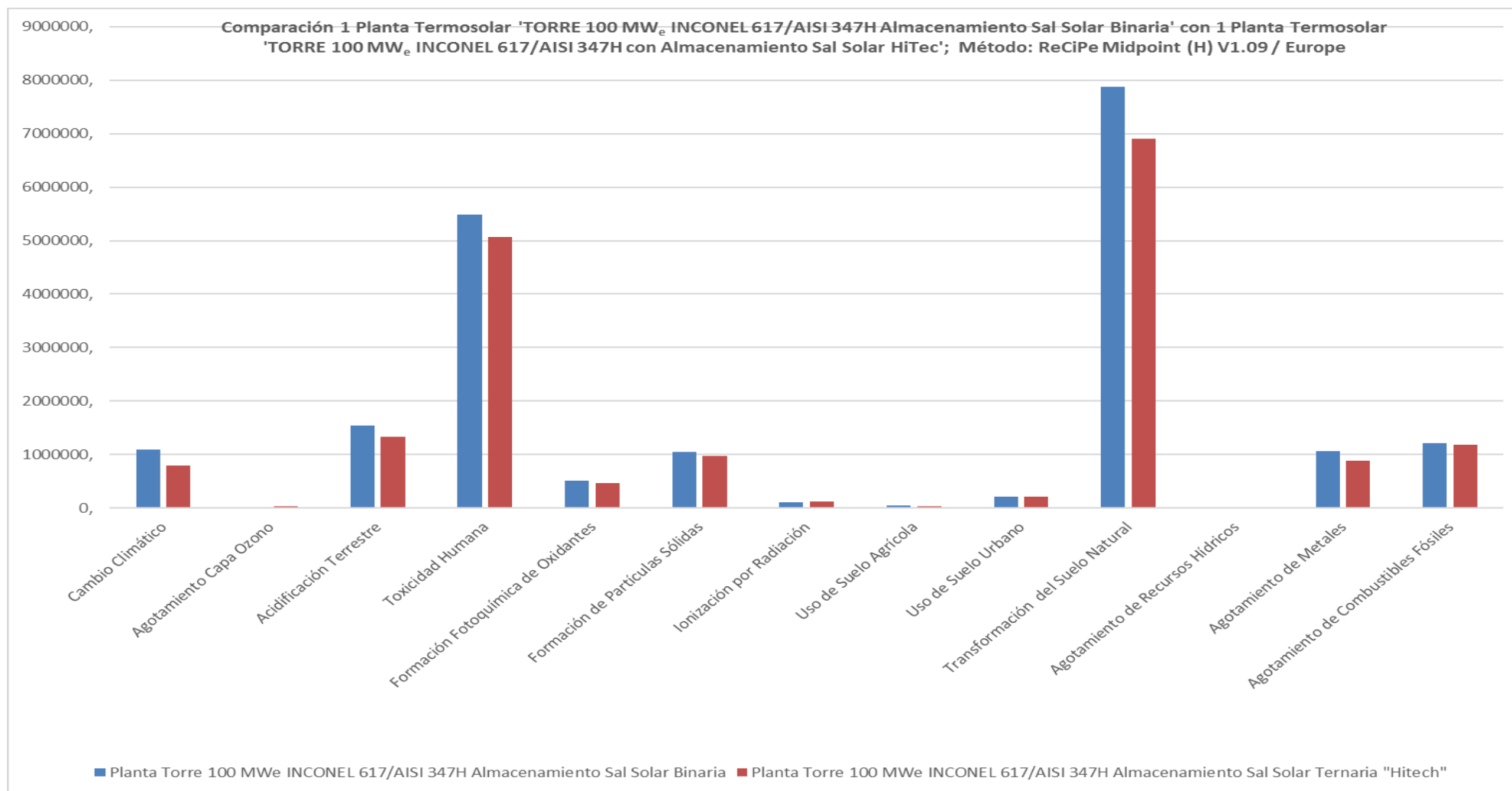


Gráfico 5.8: Gráfico de Normalización con método ReCiPe Midpoint para 1 Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y 1 Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria "Hitec" con las diferentes categorías de impacto.
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8.

Mediante el Gráfico 5.8 correspondiente a la normalización se observa que la mayor contribución corresponde a las categorías de impacto de **Transformación Natural de la Tierra** y la **Toxicidad Humana**, presentando valores más elevados para el sistema que opera mediante la Sal Solar Binaria. Las otras categorías que aportan determinada carga ambiental son los correspondientes a la **Acidificación Terrestre**, el **Agotamiento de Combustibles Fósiles**, el **Cambio Climático** y la **Formación de Partículas**.

Los datos en los que se basa el gráfico de normalización para el eje de ordenadas corresponden a los aportados en la Tabla 5.28.

Etiqueta de Categoría	Planta 100 MW _e con Sal Solar Binaria	Planta 100 MW _e con Sal Solar Ternaria “Hitec”
Cambio Climático	1.092.037,3396	794.315,474
Agotamiento Capa Ozono	14.690,4904	38.374,1322
Acidificación Terrestre	1.541.989,0703	1.339.519,8213
Toxicidad Humana	5.494.134,8752	5.071.970,416
Formación Fotoquímica de Oxidantes	516.014,2539	468.288,143
Formación de Partículas Sólidas	1.045.302,1897	975.547,6111
Ionización por Radiación	103.710,3221	121.124,3343
Uso de Suelo Agrícola	40.795,0167	36.493,2014
Uso de Suelo Urbano	204.935,2347	205.990,2502
Transformación del Suelo Natural	7.884.362,5912	6.907.127,3531
Agotamiento de Recursos Hídricos	0	0
Agotamiento de Metales	1.066.586,9987	883.541,659
Agotamiento de Combustibles Fósiles	1.211.941,9863	1.175.335,866

Tabla 5.27: Tabla de normalización comparativa correspondiente a las categorías de impacto para la Planta Termosolar de 100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y Sal Solar Ternaria “Hitec”
Fuente: Elaboración propia mediante Sima Pro 8

Como se aprecia en los datos de la Tabla 5.28, la categoría Transformación Natural de la Tierra es más favorable para el sistema que utiliza la Sal Solar Ternaria “Hitec”, al igual que para la Toxicidad Humana, aunque en menor diferencia. Las únicas categorías de impacto que presentan mayores valores para el sistema que opera mediante Sal Solar Ternaria “Hitec” son las correspondientes al Agotamiento de la capa de Ozono, Ionización por Radiación y Ocupación de Terreno Urbano.

En comparación con la tecnología de 19 MW_e se observa que las categorías de impacto afectadas son las mismas por ambas Plantas de igual tecnología, pero de diferente potencia, pero difieren los valores numéricos. Esta diferencia es debida al efecto del sistema de sales fundidas utilizado, siendo el responsable de la diferencia de valores entre las diferentes Plantas consideradas, por el efecto de las cantidades necesarias para la generación de la potencia seleccionada.



RESUMEN GENERAL Y CONTRIBUCIONES RELEVANTES

6. RESUMEN GENERAL Y CONTRIBUCIONES RELEVANTES

Mediante este apartado se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos mediante los Análisis de Ciclo de Vida realizados para los materiales, los compuestos y las plantas de diferente potencia seleccionadas. Finalmente, se interpretarán los resultados obtenidos mediante la comparativa de las centrales de diferente potencia consideradas a partir de los diferentes impactos medioambientales aportados por los sistemas seleccionados como principales componentes de las Plantas Termosolares.

La visión global comparativa del ACV de las Plantas de 19 MW_e y 100 MW_e nos va a permitir, entre otras cosas, la posibilidad de caminar hacia plantas de mayor capacidad o plantas de menor capacidad, pero más numerosas.

6.1.- Contribuciones Relevantes

Como resumen a la interpretación de los datos obtenidos mediante los ACV efectuados durante el trabajo se van a exponer por separado y en el orden establecido durante el desarrollo de esta tesis.

6.1.1.- Sobre los materiales supuestos en el estudio

Tomando en consideración la Tabla 5.11 correspondiente a la caracterización comparativa de los materiales considerados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La categoría de impacto de mayor contribución es la debida a la **Toxicidad Humana** debida prácticamente, en su totalidad, a la HRSA INCONEL 617 siendo la aportación del acero inoxidable AISI 347H, a esta categoría, prácticamente despreciable comparado con el INCONEL 617.

Mediante la comparativa entre ambos materiales, la superaleación INCONEL 617 es desfavorable con respecto al acero AISI 347H debido principalmente al alto contenido en Mo que presenta la primera (como se aprecia en el Gráfico 3.5 de normalización de INCONEL 617), debido al proceso de obtención del Ni, Mo y en menor medida el Co ya que se trata de unos metales pesados con alto impacto sobre la toxicidad humana. En

cifras, las aportaciones de cada uno de los materiales contemplados para esta categoría en unidades equivalentes de 1,4 diclorobenceno resultaron:

$$\text{INCONEL 617} \rightarrow 417 \text{ kg.1,4-DB}_{\text{equiv}}$$

$$\text{AISI 347H} \rightarrow 10,2 \text{ kg.1,4-DB}_{\text{equiv}}$$

- Para el caso de la otra categoría de impacto más influyente como es la correspondiente al **Agotamiento de Metales** se observa que la superaleación INCONEL 617 vuelve a ser desfavorable respecto al acero inoxidable AISI 347H siendo las cifras en $\text{kg.Fe}_{\text{equiv}}$ correspondientes a cada uno de ellos las siguientes:

$$\text{INCONEL 617} \rightarrow 106 \text{ kg.Fe}_{\text{equiv}}$$

$$\text{AISI 347H} \rightarrow 14,2 \text{ kg.Fe}_{\text{equiv}}$$

Las aportaciones a esta categoría de impacto se deben principalmente al proceso de obtención del Mo, del Ni y por último del Cr para su incorporación en el material.

La categoría correspondiente al **Cambio Climático** presenta valores de $\text{kg.CO}_2_{\text{equiv}}$ superiores para el INCONEL 617 y por tanto se ve desfavorecido.

La **Acidificación** que representa los $\text{kg.SO}_2_{\text{equiv}}$ presenta mayor aporte por parte del INCONEL 617.

La **Formación Fotoquímica de Oxidantes** (en kg. NMVOC), la **Formación de Partículas** (en $\text{kg.PM}_{10\text{equiv}}$), la **Ionización por Radiación** (en $\text{kBq U}^{235}_{\text{equiv}}$), la **Ocupación de Terreno Urbano** (en m^2), el **Consumo de Recursos Hídricos** (en m^3) y el **Consumo de Combustibles Fósiles** (en $\text{kg.Oil}_{\text{equiv}}$) arrojan valores para el INCONEL 617 que, como mínimo, doblan a los que aporta el acero inoxidable AISI 347H.

Cabe destacar en ninguna de las categorías de impacto hay algún valor de los arrojados por el acero inoxidable AISI 347H que supere a los de la superaleación INCONEL 617.

En resumen, la superaleación INCONEL 617, a pesar de sus excelentes propiedades como material para trabajar a elevadas temperaturas es, medioambientalmente, el material menos favorable a la hora de formar parte de una planta termosolar con esta tecnología debido a que los principales componentes comentados

tienen una elevada incidencia sobre la potencial toxicidad humana a determinadas concentraciones en los diferentes medios sobre la calidad del aire y la ingesta diaria admisible por el ser humano. Por lo tanto, el material adecuado para el uso en esta tecnología sería el acero inoxidable AISI 347H.

6.1.2.- Sobre los compuestos para almacenamiento térmico (sales fundidas) supuestos en el estudio

Si se tiene en cuenta la evaluación efectuada mediante ACV comparativo de los compuestos considerados para almacenamiento térmico, efectuado en el apartado 5.3.2, se aprecia mediante el Gráfico 5.2 que las categorías de impacto con mayor contribución corresponden a la Transformación Natural del Terreno, la Toxicidad Humana, la Acidificación Terrestre, el Agotamiento de Combustibles Fósiles, el Agotamiento de Metales y el Cambio Climático, aunque las de mayor impacto son las dos primeras siendo estas sobre las que se profundizará. Para todas ellas se muestra desfavorable el compuesto Sal Solar Binaria.

La categoría **Transformación Natural del Terreno** corresponde a la ocupación y transformación de la superficie de tierra destinada a la explotación minera de los nitratos. Los efectos provocados son los correspondientes al uso del terreno, la extensión de la superficie utilizada y la duración de ello. La transformación natural del terreno considera la amplitud de los cambios en las propiedades de la tierra. Como se aprecia en el Gráfico 8 perteneciente a la normalización del ACV de la Sal Solar Binaria, la mayor contribución a esta categoría la aporta el NaNO_3 previsiblemente por tratarse del componente de mayor porcentaje en el compuesto y para su obtención se utiliza HNO_3 . Para el caso de la Sal Solar Ternaria “Hitec”, la mayor contribución se corresponde con el NaNO_2 por tratarse del componente de mayor porcentaje seguido por el KNO_3 y el de menor contribución a dicha categoría el NaNO_3 por ser el de menor porcentaje.

Si nos fijamos en el ACV comparativo entre ambas sales se aprecia un mayor impacto en esta categoría por parte de la Sal Solar Binaria lo que nos indica que el componente de mayor influencia sobre ella es el NaNO_3 .

La categoría de impacto correspondiente a la **Toxicidad Humana** expuesta en el Gráfico 15 de normalización comparativo entre las dos sales solares consideradas indica

que la Sal Solar Binaria es ligeramente más desfavorable que la Sal Solar Ternaria “Hitec”. En la Tabla 3.6 correspondiente a los valores de normalización de la Sal Solar Binaria se aprecia que la contribución, a esta categoría, del NaNO_3 es bastante superior a la del KNO_3 y en el caso de la Sal Solar Ternaria “Hitec” (Tabla 3.8), a pesar de encontrarse en menor proporción que los otros dos, el NaNO_3 presenta un valor cercano a ellos.

Observando la Tabla 5.13 correspondiente a los datos de caracterización comparativos para ambas sales solares se aprecia que la contribución a la categoría correspondiente al **Cambio Climático** en cuanto a emisiones de CO_2 , es bastante superior en el caso de la Sal Solar Binaria.

El resto de categorías de impacto presentan valores muy parecidos en ambas sales sirviendo como apreciación que para la Sal Solar Ternaria “Hitec”, solo son ligeramente superiores los valores correspondientes a las categorías de **Agotamiento de la Capa de Ozono**, **Ionización por Radiación**, **Ocupación de Terreno Urbano** y **Consumo de Recursos Hídricos**.

6.1.3.- Sobre la Planta CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria

En el Análisis de Ciclo de Vida realizado para esta configuración de planta se obtuvo como resultado que las categorías de impacto de mayor contribución fueron las correspondientes a la Transformación Natural de la Tierra y Toxicidad Humana debidas principalmente al sistema Sal Solar Binaria según se aporta mediante el Gráfico 5.3 del apartado 5.3.3.1.

Mediante la Tabla 5.17 correspondiente a los valores de normalización se observa que, para la categoría de **Transformación Natural de la Tierra**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria debido al impacto ambiental provocado por la propia sal y como segunda se encuentra la contribución aportada por el sistema **Bloque de Potencia** debido a su elevado contenido en superaleación INCONEL 617.

En la misma tabla, se aprecia la influencia de la otra categoría de impacto con mayor peso, la de **Toxicidad Humana** para la cual la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria debido a los elevados contenidos en nitratos y, por otro lado,

las siguientes contribuciones en menor medida corresponden al sistema bloque de potencia y receptor debido a las elevadas cantidades de Ni, Cr y Mo que presenta el material que los componen (INCONEL 617).

Para la categoría **Acidificación Terrestre**, el sistema con mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria debido a la formación de ácidos mediante los nitratos y a mayor distancia, pero también contributivos, se encuentran los sistemas Bloque de Potencia y Receptor debido a los procesos de obtención de los elementos que forman sus principales componentes.

La categoría de **Agotamiento de Combustibles Fósiles** tiene como principal aportación la del sistema Sal Solar Binaria debido a los procesos de obtención. Las contribuciones del resto de los sistemas implicados en este análisis tienen una contribución muy pequeña.

En la categoría de **Cambio Climático**, la principal fuente de emisiones de CO₂ corresponde al sistema Sal Solar Binaria. La contribución del resto de los sistemas a esta categoría tiene muy bajo valor.

Sobre la categoría correspondiente al **Agotamiento de Metales**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria y la igual que sucedía con las categorías de Toxicidad Humana y Acidificación Terrestre, los otros sistemas que contribuyen a ella son los de bloque de potencia y receptor.

Observando las contribuciones de los sistemas a las diferentes categorías de impacto se aprecia que aquellos que presentan pequeñas cantidades de superaleación INCONEL 617 y los que solo contienen el acero inoxidable AISI 347H presentan un valor muy bajo en la tabla de normalización.

6.1.4.- Sobre la Planta CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”

Mediante el ACV realizado para esta configuración se obtuvieron unos resultados que indican que las categorías más desfavorecidas, al igual que en el caso de la configuración con Sal Solar Binaria, corresponden a las categorías de impacto,

Transformación Natural del Terreno y la Toxicidad Humana, ambas debidas principalmente al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” aunque los valores obtenidos en la tabla de normalización son inferiores a los aportados en la configuración Sal Solar Binaria.

La base de datos utilizada y el método seguido son los mismos que en el caso anterior. El inventario utilizado ha sido el mismo que para el caso de la Sal Solar Binaria, pero sustituyendo esta, como compuesto de transferencia térmica, por el de Sal Solar Ternaria, cuya cantidad empleada en toda la planta es algo inferior al de la sal binaria.

Tomando como referencia la Tabla 5.18 correspondiente a la normalización de valores se observa que para la categoría **Transformación Natural del Terreno**, el sistema que aporta mayor carga ambiental es el de Sal Solar Ternaria “Hitec” y en mucha menor medida los sistemas Bloque de Potencia y Receptor debido a su composición en superaleación INCONEL 617.

En cuanto a la categoría **Toxicidad Humana** el sistema más contributivo y por lo tanto desfavorable, aunque inferiores valores a la Transformación Natural del Terreno, es de nuevo el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” seguido a mucha distancia por los sistemas Bloque de Potencia, sistema Receptor y Sistema de conductos de Sales calientes (565°C), por este orden y todos ellos debido a la contribución de la superaleación INCONEL 617.

Para la categoría de **Acidificación Terrestre**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar ternaria “Hitec” y en menor medida los sistemas Bloque de Potencia y Receptor. El resto de contribuciones por parte de los demás sistemas son muy inferiores a los anteriores.

En la categoría **Agotamiento de Combustibles Fósiles**, la mayor carga ambiental es la aportada por el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”, el resto de los sistemas contribuyen en cantidades muy inferiores a este.

La siguiente categoría en orden contributivo decreciente es el que corresponde al **Agotamiento de Metales** para la que la mayor contribución se debe al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” seguido del Bloque de Potencia y Receptor. Con mucha menor contribución, cabe nombrar unos sistemas que no se habían prodigado hasta el momento y que corresponden a los sistemas Conductos de Sales calientes (565°C) y Conductos de

Sales frías (290°C), aunque la contribución de ellos es muy inferior a los otros mencionados.

La última categoría que se ve afectada, aunque e mucha menor medida que las anteriores es la de **Cambio Climático**, en la que la mayor contribución por emisiones de CO₂ a la atmósfera es la debida al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”. La contribución del resto de sistemas sobre esta categoría, es prácticamente despreciable.

Como resumen a esta configuración, concluir que el sistema con mayor contribución a todas las categorías de impacto consideradas es el debido al de Sal Solar Ternaria “Hitec”.

6.1.5.- Sobre la Planta CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria

En el ACV realizado para esta configuración se alcanzan valores más elevados de todas las categorías de impacto debido a que la cantidad de materiales y compuestos necesarios para esta configuración son mucho más elevados que para los casos anteriores, como se puede apreciar en la Tabla 5.19 correspondiente al resumen de inventario para la Planta termosolar de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria.

Tanto el método utilizado como la base de datos son los mismos que los empleados en todos los análisis realizados y los datos obtenidos para el desarrollo del Gráfico 5.5 correspondiente al de normalización para esta configuración indican que las categorías de impacto con mayor contribución son los debidos a la **Transformación Natural del Terreno y Toxicidad Humana**.

Mediante la Tabla 5.21 correspondiente a la normalización se observa que la mayor contribución a la categoría **Transformación Natural del Terreno** es la debida al sistema Sal Solar Binaria, siendo de largo, la categoría más afectada y debido, casi totalmente, a la contribución de este sistema. La contribución de los demás sistemas respecto al de Sal Solar Binaria no llegan al 1%.

Para la categoría **Toxicidad Humana**, la contribución por parte de otros sistemas es más apreciable que en el caso anterior. Así, la mayor contribución vuelve a ser debido

al sistema Sal Solar Binaria, pero si toma especial importancia el aporte de los sistemas como el Tanque de Sales calientes (565°C) por encima del Bloque de Potencia. La influencia del sistema Tanque de Sales calientes (565°C) es debido a las grandes cantidades necesarias de INCONEL 617 en la estructura del tanque, para albergar la enorme cantidad de sales fundidas necesarias para la operatividad de la planta.

Para la categoría **Acidificación Terrestre**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria y como segundo sistema contributivo, pero sin llegar al 1% de la anterior, se encuentra el sistema Tanque de Sales calientes (565°C).

Para la categoría **Agotamiento de Combustibles Fósiles**, el sistema con mayor contribución es, nuevamente, el sistema Sal Solar Binaria. Las contribuciones del resto de los sistemas no llegan al 0,1% en cada caso.

En la categoría correspondiente al **Cambio Climático**, el sistema más contributivo en cuanto a emisiones de CO₂ vuelve a ser el sistema Sal Solar Binaria. El resto de sistemas tienen una contribución muy pequeña a esta categoría.

En la categoría de **Formación de Partículas en Suspensión**, la mayor contribución corresponde al sistema Sal Solar Binaria al igual que sucede con la categoría **Agotamiento de Metales**.

Como resumen a esta configuración decir que el sistema Sal Solar Binaria es el más contributivo a todas las categorías de impacto y todos los valores aportados por los diferentes sistemas son muy superiores a sus respectivos en las configuraciones de 19 MWe.

6.1.6.- Sobre la Planta CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”

En el ACV realizado para esta configuración el compuesto para almacenamiento térmico utilizado ha sido la Sal Solar Ternaria “Hitec” considerando el mismo inventario que en el caso anterior, pero sustituyendo la Sal Solar Binaria por esta otra. Se ha considerado el resto de componentes de los diferentes sistemas iguales a los del caso anterior, así como el método de evaluación y la base de datos seleccionada.

Mediante el Gráfico 5.6 correspondiente a la normalización se observa que las categorías de impacto con mayor contribución son las correspondientes a la Transformación Natural del Terreno, Toxicidad Humana, Acidificación Terrestre y Agotamiento de Combustibles Fósiles.

A partir de ello y teniendo observando los valores aportados por la Tabla 5.24 de datos de normalización se puede deducir lo siguiente para esta configuración de planta:

La categoría **Transformación Natural del Terreno** es la de mayor es la de mayor impacto siendo el sistema con mayor contribución a ello el correspondiente a Sal Solar Ternaria “Hitec”. Otros sistemas con contribución a esta categoría son el de Tanque de Sales calientes (565°C), Bloque de Potencia y Receptor, aunque los valores que presentan no llegan a ser el 1% del aportado por el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”.

La categoría **Toxicidad Humana** es la segunda que presenta mayor índice de impacto siendo de nuevo el sistema más contributivo el correspondiente al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”. La contribución del resto de los sistemas es más representativa que en el caso de la anterior categoría (Transformación Natural del Terreno) siendo le segundo de más aportación el correspondiente al sistema Tanque de Sales calientes (565°C) que representa un 3,5% del aportados por el sistema Sal Solar Ternaria “Hitec”, seguido del Bloque de Potencia (1,5%), el Receptor (1%) y el de los Conductos de Sales calientes (565°C) (0,62%).

En la categoría **Acidificación Terrestre**, inferior a las anteriores, la mayor contribución es debida al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” y con bastante menor contribución el sistema Tanque de Sales calientes (565°C), Bloque de Potencia y Receptor, por este orden.

Para la categoría **Agotamiento de Combustibles Fósiles**, el sistema de mayor contribución corresponde al de Sal Solar Ternaria “Hitec” siendo la contribución del resto de sistemas prácticamente despreciables, al igual que sucede con la categoría de impacto correspondiente al **Cambio Climático**.

A modo de resumen y una vez vistas las contribuciones de los diferentes sistemas a las categorías de impacto considerados se comprueba que la mayor contribución a todas

ellas corresponde al sistema Sal Solar Ternaria “Hitec” siendo el resto de los sistemas muy poco contributivos con relación al anterior. Como se aprecia en el Gráfico 5.6, no se aprecia, por parte de los sistemas distintos al de Sal Solar Ternaria “Hitec”, una contribución que se pueda tener en consideración para su valoración en los resultados finales.

Como paso final a las conclusiones de los Análisis de Ciclo de Vida realizados en esta tesis y debido a que en todas las configuraciones supuestas las categorías de impacto que se ven más afectadas son, principalmente, las correspondientes a la Transformación Natural del Terreno, Toxicidad Humana, Acidificación Terrestre, Agotamiento de Combustibles fósiles, Formación de Partículas en Suspensión, Agotamiento de Metales y por último Cambio Climático y ya que el principal sistema contributivo a ellas es el perteneciente a las Sales Fundidas, se procede a la explicación de las conclusiones teniendo en consideración el uso de uno u otro tipo de sal fundida respecto el empleo en una central termosolar de la misma potencia para los dos casos (19 MW_e y 100 MW_e).

Antes de comenzar con el desarrollo de las conclusiones se establece una perspectiva global a modo de resumen de los pasos seguidos a lo largo de las diferentes evaluaciones realizadas.

Para las configuraciones que se han propuesto en el estudio se han examinado las categorías más afectadas y a continuación, de los sistemas seleccionados en las Plantas, los que aportan mayor contribución a ellas.

- Para el método seleccionado (ReCiPe con perspectiva Jerárquica), las categorías de impacto se calculan a través de sus correspondientes indicadores sin haber tenido en cuenta la ponderación, apareciendo un impacto mayor sobre sobre las categorías de Transformación Natural de la Tierra y Toxicidad Humana, siendo más elevado el de la primera que es la responsable de la transformación y uso de la tierra por el hecho de la extracción de minerales para la posterior obtención de los compuestos y elementos utilizados en la Planta y en la Toxicidad Humana las emisiones de compuestos orgánicos e inorgánicos, responsables del cambio climático, agotamiento de la capa de ozono etc. Las categorías con menor impacto que no se han tenido en cuenta son las correspondientes a la Eutrofización (marina y fluvial) y la Ecotoxicidad terrestre, de agua dulce y marina.

- El análisis mediante árbol de proceso se realizó en los materiales y compuestos (sales para el almacenamiento térmico), nos vamos a fijar en este por su influencia en las configuraciones estudiadas, para la categoría que presenta mayor impacto que es la de Transformación Natural del Terreno. Para la sal Solar Binaria, la mayor contribución es debida al NaNO_3 debido al factor mercado y obtención a partir de cenizas de soda y HNO_3 , siendo mucho menor la contribución del KNO_3 .

En el caso de la Sal Solar Ternaria “Hitec”, la principal contribución es debida al NaNO_2 por el factor mercado y el proceso de obtención a partir de NaOH y NO_2 . La segunda contribución en importancia se debe al KNO_3 debido al factor mercado y a su método de obtención, principalmente a partir del HNO_3 . En este caso la contribución del NaNO_3 es muy pequeña debido a su escasez en la composición de la sal.

- A partir del análisis de inventario se comprenderá qué tipo de Planta es más favorable a partir de la contribución de los diferentes sistemas seleccionados a las categorías de impacto más afectadas por el uso de alguno de los dos tipos de compuestos para almacenamiento térmico.

6.1.7.- Sobre el ACV comparativo entre Plantas CSP de 19 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria/Sal Solar Ternaria “Hitec”

Mediante esta evaluación se ha pretendido establecer una comparación entre dos Plantas termosolares de potencia 19 MWe utilizando diferente compuesto para almacenamiento para discutir cuál de los dos tipos es más respetuoso con el medio ambiente.

Como se vio anteriormente (Gráfico 5.7), de entre todas las categorías de impacto contempladas, las más afectadas correspondían a la Transformación Natural de la Tierra y Toxicidad Humana principalmente, también contribuían a la Acidificación Terrestre, el Agotamiento de Combustibles Fósiles, Formación de Partículas en Suspensión, Agotamiento de Metales, Cambio Climático y Formación Fotoquímica de Oxidantes.

En todos los casos se observa que la configuración más favorable es la que corresponde al uso de Sal Solar Ternaria “Hitec” como compuesto de almacenamiento ya que la contribución de los diferentes sistemas a las categorías de impacto afectadas es

menor para este caso.

Si tenemos en cuenta la Tabla 5.25 de caracterización comparativa entre ambas sales consideradas, se observa que todos los valores numéricos correspondientes a las diferentes categorías de impacto son superiores para el caso en que se usa como compuesto la Sal Solar Binaria excepto en los casos:

- Agotamiento de la Capa de Ozono
- Ionización mediante Radiación
- Consumo de Recursos Hídricos

En estos tres casos, los valores de las categorías de impacto son superiores para la configuración mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”, siendo la diferencia más apreciable la debida al Agotamiento de la Capa de Ozono. La causa se encuentra en la composición de esta sal por su facilidad en la formación de nitratos a partir de la reacción de oxidación de los nitritos en presencia del O₂ atmosférico, por la absorción de CO₂ para formar carbonatos y por la absorción de vapor de agua para formar hidróxidos metálicos. Todo ello daría lugar a la formación de óxidos de nitrógeno y otros compuestos incluidos en los CFC’s como responsables del agotamiento de la capa de ozono.

6.1.8.- Sobre el ACV comparativo entre Plantas CSP de 100 MWe con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria/Sal Solar Ternaria “Hitec”

En esta configuración, para conseguir la potencia supuesta de 100 MW_e, la cantidad de materiales y compuestos de almacenamiento térmico son muy superiores al caso anterior. Las categorías de impacto mayormente afectadas son también las correspondientes a la Transformación Natural del Terreno y Toxicidad Humana debido a la contribución de los diferentes sistemas involucrados en la evaluación, sobre todo el sistema sal solar “Hitec”. Al igual que en el caso anterior, las categorías afectadas en menor medida son las correspondientes a la Acidificación Terrestre, el Agotamiento de Combustibles Fósiles, Formación de Partículas en Suspensión, Cambio Climático, Agotamiento de Metales y Formación Fotoquímica de Oxidantes, por este orden y con valores muy superiores al caso de la Planta de 19 MW_e. Al igual que en el caso anterior, sólo las categorías de impacto correspondientes al Agotamiento de la Capa de Ozono, Ionización mediante Radiación y Agotamiento de Recursos Hídricos, presentan valores superiores en la planta que opera con Sal Solar Ternaria “Hitec”.

En este caso y al igual que el de la Planta de 19 MW_e, la Planta que presenta el almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria es menos favorable que el de Sal Solar Ternaria “Hitec”.



CONCLUSIONES FINALES

7. CONCLUSIONES FINALES

Como conclusiones al trabajo desarrollado en esta tesis se comentan las perspectivas del desarrollo de la tecnología de receptor central de torre en cuanto a los materiales a emplear en los diferentes sistemas considerados, así como para los compuestos utilizados para el almacenamiento térmico que permita el mantenimiento operativo de las Plantas consideradas, en ausencia de radiación solar durante un período de 15 horas. El estudio medioambiental de los materiales y compuestos involucrados en los sistemas, así como el de las plantas de diferente potencia con ellos ha permitido conocer, a través de las diferentes categorías de impacto cuáles de ellos y ellas son los más respetuosos con el medio ambiente.

Mediante este trabajo se ha intentado desarrollar, siempre desde el punto de vista medioambiental, las capacidades de esta tecnología mediante la combinación de materiales y compuestos de almacenamiento térmico ya conocidos, aunque no probados en algunos de los sistemas considerados, principalmente, por tratarse de materiales caros, pero de enormes posibilidades en cuanto a su durabilidad y comportamiento en servicio.

Se considera pues, un estudio medioambiental que, como continuación a él, podría tener un análisis económico de viabilidad y la posibilidad de ir incorporando nuevos materiales y compuestos que pudieran surgir en un futuro.

7.1.- Resumen

Para el desarrollo de esta tesis se ha recurrido al análisis técnico de las diferentes tecnologías CSP y más en concreto la de receptor central de torre con almacenamiento térmico mediante sales fundidas recurriendo al estado del arte para entender la situación actual de esta tecnología y los avances actuales. En este sentido, se ha podido comprobar que los principales progresos en este campo se encuentran en la utilización de materiales para los diferentes sistemas de este tipo de Plantas Termosolares que sean capaces de resistir las más exigentes condiciones de trabajo sin que sufran una merma importante en sus propiedades, al menos durante el período de vida útil de la planta que se estima de 20 años como mínimo. El uso de compuestos para el almacenamiento térmico, como los considerados en este trabajo, estará limitado por las temperaturas de trabajo que marcarán

la posible descomposición de los mismos y por tanto su degradación que conducen a su bajo rendimiento, así como la pureza de los mismos ya que, como se vio en capítulos anteriores, la aparición de productos impuros en la composición de la sal ocasiona una disminución en sus propiedades y la aparición de compuestos contaminantes que pudieran ocasionar daños en el medio ambiente.

Para la configuración de las Plantas se ha utilizado una simulación informática que nos ha permitido la valorización de las cantidades de materiales y compuestos necesarios para la operatividad de las mismas asegurando, mediante la implementación de los sistemas y las cantidades de sales supuestas, la actividad de la planta durante un período de 15 horas en ausencia de radiación solar.

Una vez seleccionados los materiales que se han considerado como idóneos para cumplir los requisitos comentados y supuesto el uso de los dos tipos de sales comúnmente utilizadas para esta tecnología, se ha realizado una evaluación medioambiental profunda sobre ellos con su posterior incidencia sobre su uso en las Plantas seleccionadas. A pesar de que la finalidad esté basada en la competitividad tecnológica del sistema, se ha perseguido el interés bajo un criterio medioambiental y no económico a pesar de que en la actualidad prima lo segundo sobre lo primero.

De acuerdo con la operatividad del sistema, los modelos propuestos persiguen el funcionamiento de las diferentes Plantas Termosolares de forma autónoma, en ausencia de hibridación y con independencia casi absoluta del uso de combustibles fósiles para su funcionamiento en continuo. Mediante el uso de materiales de excelentes propiedades, garantizan el funcionamiento de las Plantas sin que surjan problemas de degradación por las exigentes condiciones de trabajo y que sin ellos se acortarían los períodos de actividad de ellas. Por otro lado, la optimización en las cantidades de compuestos para el almacenamiento térmico, permiten la operatividad de las Plantas durante los períodos de ausencia de radiación solar, siendo un factor importante su ubicación geográfica y la seleccionada para este estudio garantiza las condiciones meteorológicas idóneas para su correcto funcionamiento durante esos períodos.

Para el diseño de las Plantas se han tenido en cuenta los sistemas más influyentes, en cuanto a la selección de los materiales y compuestos de almacenamiento térmico, en el funcionamiento de las Plantas como han sido el receptor, los tanques de

almacenamiento, el volumen de sales fundidas, los conductos por los que circula la sal y el bloque de potencia.

1) El **receptor** propuesto ha sido el de tipo cilíndrico que es el más utilizado para trabajar con sales fundidas como fluido caloportador utilizando paneles de tubos, para el intercambio térmico sal fundida/radiación procedente de los heliostatos, de superaleación INCONEL 617 cuyas dimensiones y pesos se han calculado de acuerdo a la implementación de los datos bibliográficos existentes.

2) Los **tanques para almacenamiento** de sales se han diseñado con las dimensiones aportadas por la herramienta informática SAM de NREL de acuerdo al volumen de sales necesario para conseguir el período de funcionamiento de 15 horas en ausencia de radiación solar con los materiales INCONEL 617 y acero inoxidable AISI 347H cuyas propiedades permiten eludir, en gran medida, la formación de compuestos que pudieran contaminar la sal fundida en contacto con ellos así como el ataque de las impurezas presentes en las sales.

3) El **volumen de sales fundidas** utilizado se ha obtenido a partir de la aplicación informática SAM de acuerdo a los parámetros introducidos en él para conseguir el funcionamiento de la Planta durante 15 horas en ausencia de radiación solar. Se han tenido en cuenta dos tipos de sales fundidas con características diferentes y volúmenes similares, para una misma configuración de Planta que mediante el estudio medioambiental posterior nos permitieron seleccionar cuál de ellas aporta un impacto menor sobre el medio ambiente.

Dado que se trata de un producto industrial, la posibilidad de existencia de impurezas en la sal como factor determinante en la degradación de las sales, es un factor que no se puede alterar y sería un apartado a mejorar.

4) Los **conductos** por los que fluyen las sales fundidas, al igual que sucede con los tanques de almacenamiento de sales, se han considerado los mismos que en ellos dependiendo de la temperatura de las sales que circulan por ellas. Se ha supuesto una longitud determinada de trazado ya que las configuraciones seleccionadas no se ajustan a un patrón y la bibliografía consultada no aporta dimensiones específicas para cada Planta.

5) Para el **bloque de potencia** se ha tenido en cuenta el intercambiador como principal responsable de generar el vapor necesario para mover la turbina y producir electricidad. El intercambiador está compuesto por una serie de tubos en los que existe contacto sal fundida caliente/agua lo que precisa el empleo de un material con elevada resistencia a la temperatura considerando para ello la superaleación INCONEL 617 cuyas cantidades han sido extraídas de configuraciones similares existentes.

La evaluación medioambiental se ha realizado mediante un Análisis de Ciclo de Vida con la herramienta informática SimaPro 8 evaluando las categorías de impacto sobre las que existe mayor incidencia para los casos de materiales, compuestos y las diferentes configuraciones de Planta supuestas. Estudios realizados sobre diferentes ACV de diversas tecnologías CSP se basan en las emisiones de CO₂ siendo en el caso expuesto un análisis más riguroso al tener en cuenta diversas categorías de impacto influyentes en los sistemas y que tienen incidencia sobre otras categorías de impacto además de la ya mencionado.

Los pasos seguidos en el desarrollo de esta tesis se resumen como sigue:

1) *ACV comparativo de los materiales involucrados en los sistemas considerados*, mediante el que se ha obtenido un análisis pormenorizado de los elementos que los componen aportando las cargas ambientales de los menos favorables. Mediante el ACV comparativo de los materiales considerados se pudo observar que las cargas ambientales aportadas por el INCONEL 617 sobre las categorías de impacto más afectadas, son muy superiores a las del acero inoxidable AISI 347H siendo solamente equiparables los impactos de ambos a las categorías de Cambio Climático, Agotamiento de la Capa de Ozono, Radiación Ionizante, Ocupación de Terreno Agrícola, Ocupación de Terreno Urbano y Agotamiento de Combustibles Fósiles, categorías con un impacto muy poco influyente.

A modo de resumen, el uso de superaleación INCONEL 617 es desaconsejable en cuanto a las categorías de impacto correspondientes a la **Toxicidad Humana, Agotamiento de Metales, Acidificación Terrestre, Transformación Natural de la Tierra y Formación de Partículas en Suspensión**, por este orden.

2) **ACV comparativo para los compuestos de almacenamiento térmico considerados (sales fundidas)**, los resultados obtenidos indican que, de las categorías de impacto afectadas por su uso, la Sal Solar ternaria “Hitec” es la más favorecida. Las categorías que se vieron más afectadas fueron las correspondientes a la Transformación Natural del Terreno, Toxicidad Humana, Acidificación Terrestre, Agotamiento de Combustibles Fósiles, Cambio Climático, Formación de Partículas en Suspensión, Agotamiento de Metales y Formación Fotoquímica de Oxidantes, principalmente. De todas ellas, el compuesto más desfavorecido es el correspondiente a la Sal Solar Binaria siendo las categorías más afectadas las que corresponden a la **Transformación Natural de la Tierra, Toxicidad Humana y Acidificación Terrestre**. Para las categorías menos afectadas como son la Ocupación de Terreno Urbano, Ionización por Radiación y Ocupación de Terreno Agrícola los valores son similares para ambos compuestos, aunque la contribución es muy inferior. Como apunte comentar que en la categoría Agotamiento de la Capa de Ozono, aun siendo la menos afectada, la única contribución corresponde al compuesto Sal Solar Ternaria.

3) **ACV de las diferentes configuraciones seleccionadas**, estudio de la contribución de los diferentes sistemas considerados en las Plantas contempladas.

- **PLANTA DE 19 MW_e**: Para este caso, las categorías de impacto afectadas por los diferentes sistemas, para la Planta con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y Sal Solar ternaria “Hitec” son las mismas, pero con diferentes valores contributivos por parte de los diferentes sistemas, así, la contribución de los diferentes sistemas a las diferentes categorías de impacto en la configuración de Planta de 19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria, son superiores a los obtenidos para la misma Planta pero con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Ternaria “Hitec” debido en todos los casos al sistema Sal Solar.

3.1) **ACV comparativo para ambas configuraciones (19 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y por otro lado mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”)**, mediante el cual, se observa que las contribuciones a las diferentes categorías de impacto son mayores para la configuración que utiliza como medio de almacenamiento térmico el compuesto Sal Solar Binaria siendo las categorías más afectadas las correspondientes a la **Transformación Natural de la Tierra, Toxicidad Humana, Acidificación Terrestre, Agotamiento de Combustibles Fósiles** (con valores

muy similares para ambas), **Formación de Partículas en Suspensión, Agotamiento de Metales, Cambio Climático y Formación Fotoquímica de Oxidantes** (con valores muy similares para ambas), por este orden. Las categorías que se ven menos afectadas presentan valores muy similares y son las correspondientes a Ionización por Radiación, Ocupación de Terreno Urbano, Ocupación de Terreno Agrícola y Agotamiento de la Capa de Ozono. Estos resultados indican que el uso de Sal Solar Binaria, para esta configuración, se ve desfavorecido con respecto al que opera mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”.

- **PLANTA DE 100 MW_e**: En el caso de configuración de Planta 100 MW_e el ACV realizado para los dos tipos de compuestos de almacenamiento térmico seleccionados, considerando la contribución de los diferentes sistemas se observó que las principales categorías afectadas fueron, principalmente, las correspondientes a la **Transformación Natural de la Tierra, Toxicidad Humana y Acidificación Terrestre** cuya mayor contribución fue la debida al sistema Sal Solar. De ellas, la que presenta alguna influencia de los sistemas Tanque de Sales calientes (565°C), Bloque de Potencia y Receptor debido a su contenido en superaleación INCONEL 617, es la de Toxicidad Humana. El resto de categorías tienen contribuciones muy similares para ambas configuraciones, pero con valores dispares siendo más contributivos los que utilizan como almacenamiento térmico el compuesto Sal Solar Binaria.

3.2) **ACV comparativo para ambas configuraciones (100 MW_e con almacenamiento térmico mediante Sal Solar Binaria y por otro lado mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”)**, mediante el cual se aprecia que las contribuciones a las categorías de impacto más afectadas se deben al sistema que utiliza como compuesto de almacenamiento térmico el de Sal Solar Binaria. Para las menos afectadas como son el Agotamiento de Combustibles Fósiles, Formación Fotoquímica de Oxidantes, Ocupación de Terreno Urbano y Agrícola e Ionización por Radiación los valores contributivos para ambas configuraciones son muy similares. Para la categoría correspondiente al Cambio Climático que mide las emisiones de CO₂, la configuración más favorecida es la correspondiente a la que opera mediante almacenamiento térmico con Sal Solar Ternaria “Hitec”.

Como resumen, los datos obtenidos mediante ACV para esta configuración, se puede deducir que el empleo de Sal Solar Ternaria “Hitec” como compuesto de almacenamiento térmico para una CSP de 100 MW_e con tecnología de receptor central de torre es la más favorable.

De forma general se puede resumir que, medioambientalmente hablando:

El empleo de materiales o más en concreto, aleaciones ricas en Ni, Mo y Cr no son beneficiosos para su incorporación en los diferentes sistemas que componen una Planta termosolar siendo más respetuoso con el medio ambiente el empleo de aceros inoxidables del tipo AISI 347H.

En cuanto **al uso de sales fundidas** de los tipos seleccionados como compuestos para el almacenamiento térmico el más beneficioso es el correspondiente a la Sal Solar Ternaria “Hitec” que aporta menor carga medioambiental hacia las categorías de impacto y como se vio en otro apartado, sus propiedades físico químicas son superiores a las aportadas por la Sal Solar Binaria.

De las configuraciones de Planta, tanto la de 19 MW_e como la de 100 MW_e se ven afectadas por las mismas categorías de impacto e incidencia de los sistemas seleccionados sobre ella, siendo el más contribuyente el sistema Sal Solar. Bien es cierto que el uso de Sal Solar Ternaria “Hitec” como compuesto para almacenamiento térmico está más favorecido al tomar valores menores sobre las categorías más afectadas. Mediante la comparativa entre Plantas de la misma potencia se corrobora lo comentado antes y es que sale beneficiada, independientemente de la potencia requerida para la planta, la que utiliza como compuesto de almacenamiento térmico la Sal Solar Ternaria “Hitec”.

7.2.- Aportes

Mediante este trabajo se ha intentado contribuir al desarrollo de esta tecnología en los siguientes puntos:

1) Se ha reunido buena parte de la información existente sobre esta tecnología para conseguir una visión global en lo referente a su estado. De la información conseguida la parte correspondiente al estado del arte no parece suficientemente actualizada debido a la

poca información existente para el tema en concreto.

2) Se ha realizado un estudio pormenorizado de los principales materiales y compuestos de los diferentes sistemas involucrados en esta tecnología como introducción a su incorporación a las centrales termosolares objeto de estudio y que podrían ser utilizados para otras tecnologías solares. Con su selección, se ha perseguido mantener un rendimiento continuo para las centrales que permitan su operatividad durante su tiempo estimado de vida y posteriormente el reciclado de gran parte de los materiales empleados en ella.

3) A través del diseño de las plantas de diferente potencia se ha pretendido explicar el impacto que supone la mayor generación energética a través de Plantas de mayor tamaño en las que el uso de materiales y compuestos se ve incrementada para conseguir tal fin y por tal motivo una mayor carga ambiental sobre las categorías de impacto afectadas y con determinada repercusión sobre el medio ambiente. La construcción de Plantas Termosolares con tecnología de receptor central de torre de mayor potencia conlleva un mayor empleo de materiales, compuestos, una mayor ocupación superficial y por tanto incremento del factor uso del suelo y la afección al impacto visual.

4) El Análisis de Ciclo de Vida ha permitido una evaluación medioambiental de diferentes aspectos de una Planta con la tecnología considerada. Por un lado, los materiales y compuestos para el almacenamiento térmico que se han considerado idóneos para los diferentes sistemas que las componen y los resultados obtenidos muestran su contribución sobre las categorías de impacto más afectadas. Por otro lado, las configuraciones supuestas de las diferentes plantas con la integración de los sistemas y los materiales y compuestos utilizados que han aportado las cargas ambientales de los diferentes sistemas siendo el más desfavorable el sistema Sal Solar. Por último, se ha realizado un ACV comparativo entre plantas de la misma potencia, pero con diferente compuesto de almacenamiento térmico de forma que, mediante este proceso, se ha podido seleccionar la Planta con menor carga ambiental respecto a las categorías de impacto más afectadas que en este caso se trata de la que opera mediante Sal Solar Ternaria “Hitec”. Considerando esto, cabe la posibilidad de influir sobre el desarrollo tecnológico de este tipo de Plantas y que sirve como impulso para la generación de energía limpia con menores impactos medioambientales.

7.3.- Futuras contribuciones

Como futuros aportes al estudio realizado, se puede influir en el desarrollo tecnológico y medioambiental de esta tecnología si tenemos en cuenta los siguientes factores:

1) Como primera propuesta la búsqueda de nuevos materiales técnicos (aceros o aleaciones) que permitan el funcionamiento de este tipo de centrales durante todo su periodo de vida sin pérdida de propiedades, dadas las exigentes condiciones a las que se ven expuestos, para evitar su degradación, mediante la incorporación de aleantes que mejoren dichas propiedades y sean medioambientalmente menos contributivos a las categorías de impacto que se han visto más afectadas.

2) La segunda propuesta iría enfocada hacia la investigación sobre compuestos de almacenamiento térmico tomando como base la Sal Solar Ternaria “Hitec” y realizando modificaciones mediante adición de nuevos componentes que permitan mejorar sus propiedades físico químicas que reduzcan su contribución a las diferentes categorías de impacto, sobre todo el correspondiente a la Toxicidad Humana. Dentro de esta propuesta sería conveniente un proceso de purificación previa de las sales inorgánicas industriales para evitar las impurezas que incorporan y que provocan la formación de compuestos tóxicos volátiles y la degradación de los materiales por estar en contacto con ellos.

3) Respecto al conjunto global de las centrales simplemente comentar que, a mayor potencia requerida, mayor es el tamaño de los sistemas implicados en ella y por tanto mayor la cantidad de materiales y compuestos para el almacenamiento térmico necesarios para ello y nos llevaría a tener mayores valores en los índices de impacto que se verían reducidos en el caso de utilizar materiales y compuestos mejorados.

El análisis realizado ha sido meramente medioambiental sin tener en cuenta el aspecto económico. Se puede presuponer que el hecho de utilizar materiales de características especiales y grandes cantidades de compuestos para almacenamiento térmico, como los propuestos para esta tesis, incrementaría la inversión para la construcción de una de estas centrales, pero hay que decir que, mediante la consulta bibliográfica de diferentes proyectos, la amortización en este tipo de tecnología es muy rápida, por ello y siguiendo en esta vía de investigación, sería conveniente tratar el aspecto económico global.



RESUMEN

8. RESUMEN

Introducción

La generación de electricidad representa un porcentaje significativo de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Este gas contribuye al efecto invernadero y el cambio climático por el efecto de la actividad humana. El incremento en el número de plantas para la generación de energía renovable, no hidroeléctricas, así como las mejoras tecnológicas han permitido la reducción de las emisiones y por lo tanto el valor indicativo de la huella de carbono.

En los últimos años, la contribución del sector de la energía renovable para la generación de energía en el mundo sigue creciendo y esto se traduce en beneficios ambientales asociados a las tecnologías tales como plantas de energía solar concentrada (CSP).

La generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables implica pequeñas cargas ambientales, un hecho demostrado por la técnica de análisis de ciclo de vida (ACV), siendo el método más adecuado para determinar el impacto ambiental. La técnica ACV enfocada a las plantas termosolares, representa los impactos asociados a todas las fases del ciclo de vida de una planta CSP, por lo general durante un período de 30 años, que incluye entre otros la extracción de materias primas, componentes de procesamiento, la construcción de la planta, operación, mantenimiento y desmantelamiento.

En 2011, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) dio a conocer un profundo estudio de una planta termosolar con tecnología de colectores cilindro-parabólicos, que se encuentra en Daggett, California. El inventario de materiales para el ciclo de vida de este estudio y los datos de rendimiento para una planta de 103 MW, junto con los datos proporcionados por el bloque de potencia para un período de 6,3 horas con almacenamiento térmico mediante sales fundidas (TES) fueron proporcionados por Worley Parsons Group. Mediante el ACV, fueron evaluadas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de agua y la demanda acumulada de energía (CED). Posteriormente se incluyeron como alternativas al estudio, la refrigeración húmeda, el bloque de potencia, configuración de almacenamiento térmico y el medio de

almacenamiento para lograr un impacto ambiental más amplio que podría ocurrir en plantas similares desarrolladas en el espectro de EE.UU.

En este trabajo se ha realizado un estudio análogo al anterior efectuado por NREL para plantas receptores de colectores cilindro-parabólicos, realizando un análisis de la evaluación del ciclo de vida comparativo de las diferentes plantas de tecnología CSP con receptor central de torre "Power Tower" y diferente potencia teniendo en cuenta dos tipos de sales fundidas (Sal Solar Binaria y Sal Solar "Hitec") los tipos y cantidades de materiales utilizados se han limitado al receptor de torre, conductos, tanques de almacenamiento de la sal y el intercambiador. De este modo se obtuvieron los impactos ambientales de los diferentes materiales y compuestos comentados mediante el apoyo de los datos de inventario publicados en las diferentes bases de datos existentes, así como los obtenidos mediante la herramienta informática SAM.

Este estudio representa un paso importante en los procesos de operación y almacenamiento térmico con este tipo de tecnología CSP que, junto con el campo de heliostatos representa la mayor parte del inventario de toda la planta y que se correspondería con las mismas emisiones proporción de GEI.

Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es el análisis medioambiental comparativo de plantas (CSP) con tecnología de receptor central de torre con almacenamiento térmico mediante sales fundidas, de dos plantas termosolares de diferente potencia y en la misma ubicación, con el fin de saber cuál de ellas es ambientalmente más respetuosa con el medio basándose en el uso de dos aleaciones específicas para los sistemas considerados y dos tipos diferentes de compuestos de almacenamiento térmico. Para este propósito, se realizó una evaluación del ciclo de vida (ACV), en primer lugar, de las aleaciones utilizadas para los sistemas de plantas consideradas y las sales fundidas como compuestos para almacenamiento térmico. A continuación, un ACV comparativo de cada una de las plantas que participan en el estudio de estos dos tipos seleccionados sales fundidas.

Las diferentes evaluaciones realizadas para esta tecnología conducen a resultados con un bajo impacto ambiental y alto retorno de energía durante la vida útil de las plantas consideradas.

Para el desarrollo de estos estudios se ha utilizado la aplicación informática SimaPro8 con el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), CED (demanda de energía acumulada) y diferentes metodologías orientadas a la valoración de los diferentes tipos de enfoque de daños.

Las principales tareas que se llevan a cabo en esta tesis son:

- Descripción de los principales aspectos de la relación del sol con energía solar.
- Descripción de la metodología de evaluación del ciclo de vida (ACV).
- Descripción de las principales tecnologías solares térmicas.
- Fundamentos teóricos de las aleaciones que participan en el estudio, así como el comportamiento de los compuestos de almacenamiento térmico considerado.
- Análisis del Ciclo de Vida de las aleaciones, materiales compuestos y almacenamiento térmico central de receptor central CSP y la torre.
- Análisis comparativo entre cada una de las plantas con el fin de cuantificar los impactos ambientales de las diferentes potencias que permitan la sostenibilidad de la planta.

Resultados

Para la consecución de los resultados, se han considerado los elementos que componen las aleaciones supuestas, efectuando la técnica de análisis de ciclo de vida para poder establecer cuál de ellas que presenta un mayor impacto ambiental con la idea de seleccionar, desde este punto de vista, el material más ventajoso para su uso en la planta.

Se consideró el mismo procedimiento para el compuesto de almacenamiento térmico (sales fundidas), a partir de los resultados individuales de ACV, expuestos en las secciones anteriores.

Posteriormente se procedió a la evaluación ambiental de cada una de las plantas termosolares de diferente potencia y misma configuración, pero con distinto compuesto de almacenamiento térmico, completando el estudio con una evaluación comparativa medioambiental de cada central termosolar con cada una de las sales fundidas que abarca el estudio.

1) Análisis de Ciclo de Vida comparativo de las aleaciones seleccionadas:

Se procedió a la comparación entre 1 kg. superaleación INCONEL 617 con 1 kg. de acero inoxidable AISI 347H. Se observa que los valores para todas las categorías de impacto son considerablemente más altos en el caso de la superaleación INCONEL 617. Respecto a la categoría de impacto más afectada, correspondiente a la Toxicidad Humana, el valor de caracterización para la superaleación INCONEL 617 resulta un valor de 419 kg.1,4 - DB_{equiv} frente 10.9 kg.1,4 - DB_{equiv} para el acero AISI 347H.

Otra categoría que presenta una gran disparidad de los valores de caracterización es la correspondiente al Agotamiento de Metales con un valor de 106 kg.Fe_{equiv} de INCONEL 617 y 14.2 de acero inoxidable AISI 347H kg.Fe_{equiv}.

En general, en todas las categorías de impacto, la carga ambiental proporcionada por el acero inoxidable AISI 347H es muy inferior a la de la superaleación INCONEL 617.

2) Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de las sales fundidas seleccionadas:

Se procedió a la realización de un ACV comparativo de 1 kg. de Sal Solar Binaria y 1 kg. de Sal Solar Ternaria "Hitec". La diferencia entre ambas radica en la incorporación de sales de nitrito en la "Hitec" y la menor concentración de NaNO₃ en la Sal Solar ternaria "Hitec".

La categoría de impacto correspondiente al Cambio Climático present valores mucho más elevados para la Sal Solar Binaria (401 kg.CO_{2equiv}) que para la "Hitec" (291 kg.CO_{2 equiv}) debido a la gran influencia del Na.

El resto de las categorías correspondientes a diferentes valores de impacto son similares y muestran poca diferencia entre las dos sales de valores numéricos.

Mediante el análisis de Normalización se obtuvo que, para ambos compuestos, las categorías de impacto más afectadas correspondieron a la Transformación del Suelo Natural y Toxicidad Humana, siendo los valores más elevados para la Sal Solar Binaria. Las restantes categorías de impacto presentan valores muy inferiores a los mencionados anteriormente.

3) Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de una CSP de receptor central de torre de 19 MW_e con Sal Solar Binaria frente Sal Solar “Hitec”:

La cantidad de sal solar seleccionada ha sido calculada para alcanzar un tiempo de servicio de 15 horas de forma continua y en ausencia de radiación solar. La valoración de los resultados para las categorías de daños se obtiene mediante las categorías de impacto con la mayor carga ambiental siendo la más representativa la Transformación del Suelo Natural y la Toxicidad Humana que presenta los siguientes valores numéricos de Normalización:

Toxicidad Humana Sal Solar Binaria: 1.074.606,0967

Toxicidad Humana Sal Solar “Hitec”: 996.015,9583

El impacto causado por la sal Solar Binaria es superior al de la Sal Solar “Hitec”.

Transformación del Suelo Natural Sal Solar Binaria: 1.542.916,3288

Transformación del Suelo Natural Sal Solar “Hitec”: 1.341.751,2366

El impacto causado por la sal Solar Binaria es superior al de la Sal Solar “Hitec”.

De todas las categorías de impacto, las únicas desfavorables a la Sal Solar “Hitec” son las correspondientes al Agotamiento de la Capa de Ozono y a la de Ionización por Radiación.

4) Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de una CSP de receptor central de torre de 100 MW_e con Sal Solar Binaria frente Sal Solar “Hitec”:

Como en el caso anterior, se tiene en cuenta la cantidad de sal solar calculada para un período de 15 horas de funcionamiento continuo en ausencia de radiación solar. De todas las categorías de impacto afectadas, en general, la mayor carga ambiental corresponde a la planta que opera mediante Sal Solar Binaria, excepto la categoría correspondiente al Agotamiento de la Capa de Ozono, en el que se aprecia una gran diferencia con una mayor contribución a la planta que opera mediante Sal Solar "Hitec" y la categoría de Ionización por Radiación junto con las categorías de Agotamiento de Recursos Hídricos en la que también es ligeramente superior.

Mediante la gráfica de Normalización proporcionada por la herramienta informática SimaPro 8, se obtuvo que las contribuciones a las categorías de impacto de

Transformación del Suelo Natural y Toxicidad Humana que presenta los siguientes valores numéricos:

Toxicidad Humana Sal Solar Binaria: 5.494.134,8752

Toxicidad Humana Sal Solar “Hitec”: 5.071.970,416

El impacto causado por la Sal Solar Binaria se encuentra muy por encima del causado por la Sal Solar “Hitec”.

Transformación del Suelo Natural Sal Solar Binaria: 7.884.362,5912

Transformación del Suelo Natural Sal Solar “Hitec”: 6.907.127,3531

El impacto causado por la Sal Solar Binaria se encuentra muy por encima del ocasionado por la Sal Solar “Hitec”.

Las únicas categorías de impacto desfavorables para esta configuración de planta con almacenamiento térmico mediante Sal Solar “Hitec” son las correspondientes al Agotamiento de la Capa de Ozono, Ionización por Radiación y Ocupación de Suelo Urbano, todas ellas con valores superiores a los aportados por la configuración con almacenamiento térmico mediante Sal Solar.

Comparando esta configuración con la correspondiente a la tecnología de 19 MW_e, las categorías de impacto afectadas son las mismas para ambas plantas de igual tecnología, pero de potencia diferente, aunque de valores numéricos diferentes. Esta diferencia se debe al efecto del sistema de sales fundidas utilizado, siendo responsable de esta diferencia en valores la cantidad necesaria de compuesto de almacenamiento térmico para la generación de la potencia seleccionada.

Conclusiones

En términos generales y desde un punto de vista medioambiental se extraen las siguientes conclusiones:

El empleo de materiales o más en concreto aleaciones ricas en Ni, Mo y Cr no son beneficiosos para su incorporación en los diferentes sistemas que componen una planta termosolar, siendo ambientalmente más recomendable el uso de los aceros inoxidables del tipo AISI 347H.

Respecto al uso de sales fundidas, de los dos tipos seleccionados como compuestos para almacenamiento térmico, el más beneficioso corresponde a la Sal Solar "Hitec" ya que proporciona menos carga ambiental para las categorías de impacto y como se ve en secciones anteriores, sus propiedades físicas y químicas son superiores a las presentadas por la Sal Solar Binaria.

Respecto a las configuraciones de las plantas, ambas de 19 MW_e y 100 MW_e, se ven afectadas, en los sistemas seleccionados, por las mismas categorías de impacto siendo el sistema Sal Solar el de mayor contribución. Por tanto, el uso de Sal Solar "Hitec" como compuesto de almacenamiento térmico es el más favorecido al tomar valores más bajos en las categorías de impacto más afectadas. Por lo explicado anteriormente en la comparación entre las plantas de igual potencia e independientemente de ella, se obtiene que el empleo de Sal Solar "Hitec" sería la más recomendable para cualquiera de las configuraciones.



SUMMARY

9. SUMMARY

Introduction

The electricity generation is a significant percentage of CO₂ emissions linked to production. This gas contributes to greenhouse effect and climate change by the human activity effect. The increase in the number of non-hydroelectric renewable energy plants for power generation, as well as technological improvements have allowed lowering emissions and thus the indicative value of carbon footprint.

In recent years, the contribution of renewable energy sector for power generation in the world continues to grow and this results in environmental benefits associated with technologies such as concentrated solar power plants (CSP) or power.

The electricity generation using renewable energy sources involves small environmental loads, a fact demonstrated by the technique of life-cycle assessment (LCA), being the most suitable method for determining environmental impacts. The LCA represents the impacts associated with all stages of the life cycle of a CSP plant, usually over a period of 30 years, which includes among others the extraction of raw materials, processing components, plant construction, operation, maintenance and decommissioning.

In 2011 the National Renewable Energy Laboratory (NREL) released a stroke of a CSP plant with parabolic trough technology, located in Daggett, California. The materials inventory for the lifecycle of this study and performance data for a plant of 103 MW along with the data provided by the power block for 6.3 hours period with thermal storage in molten salts (TES) were provided by Worley-Parsons Group. In this life cycle assessment emissions of greenhouse gases (GHGs), water consumption and CED they were evaluated. Subsequently they included as alternatives to the study, the power block wet cooling, thermal storage configuration and the medium storage to achieve a broader environmental impact that could happen in similar plants developed in USA spectrum.

Analogous to this stroke effected by NREL for plant parabolic trough receivers, through this work the analysis of comparative life cycle assessment of different CSP technology plants with central tower receiver "Power Tower" and different power generated will be made by some of them taking into account two types of molten salt

(binary solar salt and "Hitec") the types and quantities of materials used to be limited to the tower, ducts, storage tanks salt and exchanger. Thus the different environmental impacts of the different materials and commented compounds using inventory data published in the different existing databases will be obtained.

This study represents an important step in the realization of a stroke for the operation and thermal storage with this type of CSP technology which, together with the heliostat field represents most of the inventory of the entire plant and that would correspond to the same proportion GHG emissions.

Objectives

The main objective of this thesis is the environmental comparative analysis for Concentrating Solar Power (CSP) plants of central tower receiver technology with thermal storage using molten salts, two thermal plants from different power and at the same location, in order to know which of them is environmentally more respectful of the environment based on the use of two specific alloys for the systems considered and two different types of thermal storage compounds. For this purpose, a life-cycle assessment (LCA), first, of the alloys used for plant systems considered and molten salts as compounds for thermal storage, then performing a comparative ACV be made of each of the plants involved in the study for these two types selected molten salts.

Different evaluations of stroke in this technology lead to results with low environmental impact and high energy return over the lifetime of the plants considered.

For the development of these studies it has used computer application SimaPro8 with the IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), CED (cumulative energy demand) and different methodologies to get oriented to the valuation of the different types of damage approach.

The main tasks carried out in this thesis are:

- Description of the main aspects of the relationship of the sun with solar energy.
- Description of the methodology of life-cycle assessment (LCA).
- Description of the main solar thermal technologies.
- Theoretical foundations of the alloys involved in the study, as well as the

behavior of thermal storage compounds considered.

- Life Cycle Assessment of alloys, composites and thermal storage central CSP central receiver and tower.
- Comparative analysis between the stroke of each of the plants in order to quantify the environmental impacts for different power to arbitrate the sustainability of the plant.

Results

It was considerate the results of corresponding alloys on elements containing using the technique of life-cycle assessment so that it can establish which presented a greater environmental impact with the idea of selecting, from this point of view, the most advantageous material.

The same procedure was considerate for the molten salt thermal storage compound, from the individual results of the LCA done in previous sections was made.

Later it was proceeded to the environmental assessment of each different configuration plant power, making a stroke for each with different compound thermal storage to complete an environmental assessment comparing each thermal plant with each of the molten salt covered by the study.

5) Comparative Life Cycle Assessment for selected alloys:

We proceeded to compare 1 kg. superalloy Inconel 617 with 1 kg. AISI 347H stainless steel. It is observed that the values for all impact categories are considerably higher in the case of INCONEL 617 superalloy respect to the AISI 347H highlighting corresponding to the category of Human Toxicity resulting in a value of 419 for the first kg.1,4 - DB_{equiv} versus 10.9 kg.1,4 - DB_{equiv} second.

Another category that presents a wide disparity of values is for the depletion of metals with a value of 106 kg.Fe_{equiv} for INCONEL 617 and 14.2 kg.Fe_{equiv} AISI 347H stainless steel.

In general, in all impact categories, the environmental load provided by AISI 347H stainless steel is much lower than that of Ni-base superalloy, Inconel 617.

6) Comparative Life Cycle Assessment for selected molten salts:

It was proceeding to carry out a comparative LCA of 1 kg. Salt Solar Binaria 1 kg. Solar Salt Ternary "Hitec". The difference between both compounds is the incorporation salts of nitrite salt and the ternary NaNO_3 concentration well below that which has the binary salt.

In of Climate Change category impact it is much higher in the binary salt (401 kg. CO_2equiv) in the Hitec (291 kg. CO_2equiv) and this to the great influence of Na on it is due.

The rest of the categories corresponding to different values of impact are similar and show little difference between the two salts numerical values.

By analyzing normalization was obtained for both compounds the most important values correspond to Natural Transformation Earth impact category and Human toxicity, taking to the Binary Salt higher than for the Hitec Salt values. The remaining categories corresponding to other values , are well below those mentioned above.

7) Comparative Life Cycle Assessment for 19 MW_e Power Planta with Binary Solar Sal versus Hitec Solar Salt:

The amount of solar salt selected has been calculated to achieve an operating period of 15 hours continuously and in the absence of solar radiation. The valuation of results for damage categories is obtained by the impact categories with the highest environmental burden being the most representative of the Natural Land Transformation and Human toxicity presenting the following numerical values:

Human toxicity Binary Solar Salt: 1,074,606.0967

Human toxicity Hitec Solar Salt: 996015.9583

The impact caused by the Solar Salt Binaria is higher than the Solar Salt Hitec.

Natural transformation Soil Binary Solar Salt: 1,542,916.3288

Natural transformation Soil Hitec Solar Salt: 1,341,751.2366

The impact caused by the Solar Salt Binaria is higher than the Solar Salt Hitec.

All impact categories, the only ones unfavorable for Solar Salt Ternary "Hitec" system are for Ozone Depletion and ionizing radiation.

8) Comparative Life Cycle Assessment for 100 MW_e Power Planta with Binary Solar Sal versus Hitec Solar Salt:

As in previous case the amount of solar salt is taken into account it has been calculated for a period of 15 hours operating continuously in the absence of sunlight. From all impact categories affected, in general, most environmental load corresponds to plant operated by Solar Salt Binary except Depletion of the ozone layer, in which a large difference can be seen between them being greater contribution Plant operated by Solar Salt Ternary "Hitec" and Ionization Radiation along with the depletion of water resources in which it is also slightly higher.

From the graph of standardization provided by the software tool it was obtained that the greatest contribution to the impact categories of Natural Transformation of Earth and human toxicity presenting the following numerical values:

Human toxicity Binary Solar Salt: 5,494,134.8752

Human toxicity Hitec Solar Salt: 5,071,970.416

The impact caused by the Solar Salt Binaria is well above the Solar Hitec.

Natural Land Transformation for Binary Solar Salt: 7,884,362.5912

Natural Land Transformation for Hitec Solar Salt: 6,907,127.3531

The impact caused by the Solar Salt Binaria is much higher than the Solar Hitec.

The only impact categories that have higher values for the system operating by Sal Solar Ternary "Hitec" are those for the depletion of the ozone layer, Ionization Radiation and Urban Land Occupancy.

Compared to 19 MW_e Power Tower technology we show the impact categories affected are the same for both plants the same technology but different power, but the numerical values differ. This difference is due to the effect of molten salt system used, being responsible for the difference in values between different plants considered, by the effect of the amounts necessary for the generation of the selected power.

Conclusions

In general terms from an environmental point of view it comes to the following conclusions:

The use of materials or more specifically, rich alloys Ni, Mo and Cr are not beneficial for incorporation in various systems that make up a solar thermal plant being more environmentally friendly use of AISI 347H stainless steels.

Regarding the use of molten salts of the two types selected as compounds for most beneficial thermal storage it's corresponding to "Hitec" Ternary Solar Salt that provides less environmental burden to the impact categories and as seen in another section, its physical and chemical properties are superior to those provided by Binary Solar Salt.

From Plant configurations, both of 19 MWe and 100 MWe the are affected by the same impact categories incidence of selected systems on it, the most taxpayer Solar Salt system. It is true the use of "Hitec" Ternary Solar Salt as a compound for thermal storage is more favored to take lower values on the categories most affected. By comparison between the same power plants corroborates what is said before and that is benefited, regardless of the power required for the plant, which used as thermal storage compound "Hitec" Ternary Solar Salt.



BIBLIOGRAFÍA

10.-BIBLIOGRAFÍA

- [1] Energy Information Administration. *International Energy Outlook*. Washington D.C. 2008.
- [2] Burkhardt J., Heath G., Turchi C., “*Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*”. *Environmental Science & Technology*, N°45 (6), pág.2457–2464, 2011.
- [3] Lechon Y., de la Rua C., Saez R., “*Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solar Thermal Technology in Spain*” Paper B5-S5. 13th SolarPACES International Symposium, Seville, Spain, June pág.20-23. 2006.
- [4] Reddy V. Siva, Kaushik S.C., Ranjan K.R., Tyagi S.K. “*State of the Art Solar Thermal Power Plants - A Review*” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [5] Zhang H.L., Baeyens J., Degreve J., Caceres G., “*Concentrated Solar Power Plants: Review and Design Methodology*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- [6] Burgaleta, J.I., Arias, S., Ramirez D. “*GEMASOLAR, the first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage*”, 2011.
- [7] Zunft S., Hanel M., Kruger M., Volker Dreißigacker F., Gohring E., “*Julich Solar Power Tower - Experimental Evaluation of the Storage Subsystem and Performance Calculation*” ASME, 2011.
- [8] Koll G., Schwarzbozl P., Hennecke K., Hartz T., Schmitz M., Hoffschmidt B. “*The Solar Tower Jülich - A research and demonstration plant for central receiver systems*”. 2009
- [9] Ershu Xu, Qiang Yu, Zhifeng Wang, Chenayao Yang. “*Modeling and simulation of 1 MW DAHAN solar thermal power tower plant*”, Elsevier, 2010
- [10] Queroa M., Korzynietzb R., Ebertc M., Jiménez M., Del Río A., Brioso J.A. “*Solugas – Operation experience of the first solar hybrid gas turbine system at MW scale*”. Elsevier Science Direct, 2013.
- [11] Meduri P.K., Hannemann C.R., Pacheco J.E. “*Performance characterization and operation of eSolar's Sierra SunTower power tower plant*”, 2010.
- [12] Romero M., Buck R., Pacheco J.E. “*An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects and Technologies*”, ASME, 2002.
- [13] Skumanich A., *CSP: Developments in heat transfer and storage materials. Renewable Energy Focus*. N°11 (5), pág. 40-43, 2011.
- [14] Barlev D., Vidu R., and Stroeve P. “*Innovation in concentrated solar power. Solar Energy Materials and Solar Cells*”. N°95 (10), pág. 2703-2725. 2011.

- [15] Green Peace international; international Solar PACES; European Solar Thermal Electricity Association, "*Global Concentrating Solar Power Outlook. Why renewable energy is hot,*" 2009.
- [16] William B., Geyer M., *Power from the sun.*: www.powerfromthesun.net, 2001.
- [17] Ming Q., Hongxi Y., and David H. Archer, "*A solar thermal cooling and heating system for a building: Experimental and model based performance analysis and design*" Solar Energy N°84, pág.166–182, 2010.
- [18] Kane M., Larrain D., Favrat D., and Allani Y., "*Small hybrid solar power system*" Energy N°28, pág.1427–1443, 2003.
- [19] FLABEG Holding GmbH. Track Record Solar Mirrors 1983–2010. <http://www.flabeg.com>
- [20] Eck M., Zarza E., Eickhoff M., Rheinlander J., and Valenzuela L., "*Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs*" Solar Energy N°74, pág. 341-351, 2003.
- [21] Eck M. and Zarza E., "*Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs*" Solar Energy N°80, pág. 1424–1433, 2006.
- [22] Álvarez Flores J.A., Callejón Agramunt I., Forns Farrús S. "*Maquinas térmicas motoras-I*" Primera Edición; Ediciones UPC; Universidad Politécnica de Cataluña; pág. 391-436, 2002.
- [23] Kongtragool B. and Wongwises S., "*A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°7 (2), pág. 131-154, 2003.
- [24] Taggart S., "*CSP: dish projects inch forward*". Renewable Energy Focus, N°9 (4) pág. 52-54, 2008.
- [25] Wu S.Y., et al., "*A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation*". Applied Energy. N°87 (2), pág. 452-462, 2010.
- [26] Adkins D. R., C.E.A., Bradshaw R.W., Goods S.H., "*Mass Transport, Corrosion, Plugging, and Their Reduction in Solar Dish Stirling Heat Pipe Receivers*". Sandia National Laboratories, 1996.
- [27] Grena R. and Tarquini P., "*Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid Energy*". N°36 (2), pág.1048-1056, 2011.
- [28] Taggart S., "*Parabolic troughs: 'CSP's quiet achiever. Renewable Energy Focus*", N°9 (2), pág.46-50, 2008.
- [29] Fernandez G. A., Zarza E., Valenzuela L., Pérez E., "*Parabolic-trough solar collectors and their applications*". Renewable and Sustainable Energy Reviews. N°14 (7), pág.1695-1721, 2010.

- [30] Rolim M.M., Fraidenraich N. and Tiba C., “*Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors*”. Solar Energy, N°83 (1), pág.126-133, 2009.
- [31] International Energy Agency 9 rue de la Federation 75739 Paris Cedex 15, France IEA, Technology Roadmap Concentrating Solar, PowerTech. Roadmap, 2010.
- [32] Segal A. and Epstein M., “*Comparative performances of tower-to' and tower-reflector, central solar receivers*”. Solar Energy, N°65 (4), pág.207-226, 1999.
- [33] Codd D.S. et al., “*A low cost high flux solar simulator*”. Solar Energy. N°84 (12), pág.2202-2212. 2010
- [34] Ávila Marín A. L. “*Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System Technology: A review*”. Solar Energy. N°85 (5), pág. 891-910.
- [35] SENER and Torresol Energy win U.S. CSP Today awards. Renewable Energy Focus. N°12(4), pág.12. 2011
- [36] Leonardi E., “*Detailed analysis of the solar power collected in a beam-down central receiver system*”, Solar Energy, 2012.
- [37] Ho C.K., Mahoney A.R., Ambrosini A., Bencomo M., Hall A. & Lambert T.N. “*Characterization of Pyromark 2500 pa int. for high-temperature solar receivers*” Transactions of the ASME, N°136: 014502-1 – 014502-4, 2013.
- [38] Battleson K. W., “*Solar power tower design guide: solar thermal central receiver power systems, a source of electricity and/or process heat. Annals of Nuclear Energy*”, 1981.
- [39] Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A, “*Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*”. ISBN 978-3-540-70949-7. 2007.
- [40] Kaltschmitt M., Streicher M., Wiese A. “*Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*”. 2007
- [41] Falcone PK. “*A handbook for solar central receiver design. Sandia National Laboratories*”, Livermore 1986; SAND 86-8809, 1986
- [42] Fernandez V. (2006). “*PS10: A 11 MWe Solar Tower Power Plant with Saturated Steam Receiver*”, 2006
- [43] Pacheco J.E. “*Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project*”. SAND2002-0120, 2002.
- [44] Singer C, Buck R, Pitz Paal R, Müller Steinhagen H. “*Assessment of Solar Power Tower driven ultrasupercritical steam cycles applying tubular central receivers with varied heat transfer media*”. Journal of Solar Energy Engineering, N°132, pág.1-12, 2010.

- [45] Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A., “*Renewable Energy - Technology, Economics and Environment*”, 2007.
- [46] Mancini Thomas R., “*IEA-Solar Power and Chemical Energy Systems Task III: Solar Technology and Applications Catalog of Solar Heliostats*”, 2000.
- [47] Kistler B., “*A user’s manual for DELSOL3: A computer code for calculating the optical performance and optimal system design for solar thermal central receiver plants*”. Technical report, Sandia National Laboratories, Livermore, CA (USA). 1986.
- [48] Moore R., Vernon M., Clifford K. Ho, Nathan P. Siegel and Gregory J. Kolb, “*Design Considerations for Concentrating Solar Power Tower Systems Employing Molten Salt*” Sandia National Laboratories, P.O. Box 5800 Albuquerque, NM, 2010
- [49] Kelly B., “*Lessons learned, Project history and operating experience of the Solar Two Project*”. SAND2000-2598, 2000.
- [50] Fabrizi F., “*Experimental remarks on behaviour during operation and thermal fluid dynamics in transition states of molten salt mixtures*”, NREL Denver West Business Park Golden, CO, USA. 2007.
- [51] Ávila Marín A. L. “*Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review*”. Solar Energy, N°85 (5), pág.891–910. 2011.
- [52] Strand T., Spelling J., Nilsson L. R. K., and Hansson H. “*An innovative hybrid solar gas-turbine power plant based on the topcycle concept*”. In submission to the proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on concentrating solar power and chemical energy systems, Marrakesh, Morocco. 2012.
- [53] Hoffschmidt B., Téllez F.M., Valverde A., Fernandez J. and Fernandez V. “*Performance evaluation of the 200-kWth HiTRec-II Open volumetric air receiver*”. Journal of Solar Energy Engineering, N°125 (1), pág.87, 2003.
- [54] Singh H., Saini R., and Saini J. “*A review on packed bed solar energy storage systems*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°14 (3), pág.1059–1069. 2010.
- [55] Spelling J., Favrat D., Martin A. and Augsburg G. “*Thermoeconomic optimization of a combined-cycle solar tower power plant. Energy*”, N° 41 (1), pág.120–113. Stoddard, M. (1986). *Convective loss measurements at the 10 MWe Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant*. Technical report, Sandia National Laboratories, Livermore, CA (USA). 2011.
- [56] Ren N., Wu Y.t., and Ma C.F., “*Experimental Study on Thermal Properties of New Kinds of Mixed Nitrate Salts*”. In submission to the proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, N°100, Marrakesh, Morocco. 2012.

- [57] Raade J.W., Elkin B., and Vaughn J. “*Novel 700 °C molten salt for solar thermal power generation with supercritical steam turbines*”. In Submission to the Proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on concentrating solar power and chemical energy systems, volume 001, Marrakesh, Morocco. 2012.
- [58] Garmendia A.E., Gilaberte R.N., Jiménez J.B. and Méndez Marcos J.M. “*Description of Abengoa solar tower solution with superheated steam technology*”. In submission to the proceedings of the SolarPACES 2012 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Marrakesh, Morocco.
- [59] Álvarez Flórez J. A. y Callejón Agramunt I. “*Máquinas Térmicas Motoras*”, Barcelona. 2002.
- [60] Nomoto H., Kuroki Y., Fukuda M. y Fujitsuka S. “*Recent Development of Steam Turbines with High Steam Temperature*”, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-05, April 5-7, 2005, Chicago, USA 2006.
Ebara R. “*Engineering Failure Analysis, Papers presented at the First International Conference on Engineering Failure Analysis*”, N°13, pág.516-525. 2006.
- [61] Xu Z.L., Park J.P. y Ryu S.J. “*Engineering Failure Analysis*”, N°14, pág.694-701, 2007.
- [62] Wang W.Z., Xuan F.Z., Zhu K.L. y Tu S. T. “*Engineering Failure Analysis*”, pág.632-641, 2007.
- [63] Niu L.B., Kobayashi, M., Takaku H. y Azuma T. “*Aging effect on creep rupture properties of super clean 9%CrMoV steel for steam turbine rotors of combined cycle power plants*”, Advances in Engineering Plasticity and Its Applications, pág. 931-936. 2004.
Niu L.B., Okado M., Azuma T., Sakai Y., Kobayashi M. y Takaku H. “*Tetsu to Hagan Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*”, N°89, pág.762-802, 2003.
- [64] Steingress F.M., Frost H.J. and Walker D.R. “*High Pressure Boilers, 3rd Edition*” American Technical Publishers, Inc. Homewood, IL 2003.
- [65] Phillips S., Shinotsuka K. Yamamoto and Fukuda Y. “*Application of High Steam Temperature Countermeasures in High Sulfur Coal-Fired Boilers*”.2003
- [66] Ramachadran S., Kalaichelvi P.and Sundaram S.,“*Heat Transfer Studies in a Spiral Plate Heat Exchanger for Water-Palm Oil Two Phase Systems*” Brazilian Journal of Chemical Engineering N°25(3), pág.483-490, 2008.
- [67] Yang M.X., Yang X., Yang and Ding J.,“*Heat Transfer Enhancement and Performance of the Molten Salt Receiver of a Solar Power Tower*” Applied Energy. Revised article in press 2009.
- [68] Tyner C.E., Sutherland J.P. & Gould Jr, W.R. “*Solar Two: A molten salt power tower demonstration*”. Sand 95-1828C. 1995.

- [69] Kearney D., Kelly B., Cable, R., Potrovitza. N., Hermann. U., Mahoney. R. & Blake D. “*Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*”. *Submission to JSEE*, 1-20. 2002.
- [70] Cavallaro F., “*Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems*”, *Applied Energy*, 87: pág.496-503. 2009.
- [71] Lu J., Ding J. and Yang J., “*Solidification and melting behaviors and characteristics of molten salt in cold filling pipe*”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. N°53(10), pág.1628-1635, 2010.
- [72] Goods S.H. and Bradshaw R.W., “*Constant extension rate testing of IN625LCF in molten nitrate salt*”. *Corrosion Science*, N°41(6): pág.1119-1137, 1999.
Goods S.H., “*The Effect of a Molten Nitrate Salt Environment on the Mechanical Properties of INCOLOY Alloy 800*”. *Journal of Materials for Energy Systems*, N°5(1). 1983.
- [73] Boyle G., “*Renewable Energy. Power for a Sustainable Future*”. The Open University, Oxford Press, London. 1996.
- [74] Gekas I. V., Frantzeskaki N. and Tsoutsos T., “*Environmental Impacts from the Use of Solar Energy Technologies*”, THERMIE-B STR/1000/96/HE project. 1996.
- [75] Burkhardt J., Heath G. and Turchi C., “*Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*”. *Environmental Science and Technology* N°45(6), pág.2457-2464, 2011.
- [76] OECD/IEA “*Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables*”, international Energy Agency, Paris, France. 1998.
- [77] Theodoratos P.C. and Karakasidis N.G., “*Hygiene - Occupational Safety and Environmental impact assessment and risk analysis*” 1575 Environmental protection, Ion, Grecia. 1997.
- [78] Tsoutsos T., “*Environmental Impact Assessment For Energy Projects*”, Environmental Department, Technical University of Crete. 2001.
- [79] ISO 14040.2 Draft: Life Cycle Assessment - Principles and Guidelines. The Society of Environmental Toxicology and Chemistry <http://www.setac.org>.
- [80] ISO (international Standard Organization) 14040:2006, *Environmental Management – Life cycle assessment. Principles and framework*. international Organization for Standardization (ISO).
- [81] Ding G.K.C., “*Sustainable construction, the role of environmental assessment tools*”, *Journal of Environmental Management* N°86, pág.451–464. 2008.
- [82] Tillman A.M., “*Significance of decision-making for LCA methodology*”, *Environmental Impact Assessment Review* N°20, pág.113–123. 2000.

- [83] Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S. “*Life cycle assessment in buildings: State of art and simplified LCA methodology as a complement for building certification*”, Building and Environment N°44, pág.2510-2520. 2009.
- [84] Lewis H. and Gertsakis J., “*Design Environment, a global guide to designing greener goods*”, Green leaf publishing, UK, ISBN 1874719438, 2011.
- [85] Life Cycle Assessment (LCA) – “*A guide to approaches, experiences and information sources*”, EEA, Denmark, ISBN: 92-9167-079-0, 1998.
- [86] ISO 14044:2006(en) Environmental management, Life cycle assessment, Requirements and guidelines. Online Browsing Platform (OBP)
- [87] ISO/TS 14048 (Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida (2002) y ISO/TR 14047 (Norma sobre Gestión Ambiental).
- [88] ISO 14041:1998, *Environmental Management – Life cycle assessment. Goal and scope definition and Inventory analysis*. international Organization for Standardization.
- [89] ISO 14042:2000, Environmental Management – “*Life cycle assessment. Life cycle Impact assessment*”. international organization for Standardization (ISO).
- [90] Goedkoop M. and Oele M., “*SimaPro 6. introducción al ACV*”, PRé Consultant, Holland. 2004.
- [91] ENLSIC buildings, “*Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings*”, <http://circe.cps.unizar.es/>.
- [92] Guinée J.B. “*Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products; with a case study on margarines*”, Thesis, Leiden University, Leiden, Netherlands, 1995.
- [93] Weidema B., Lindeijer E. “*Physical impacts of land use in product life cycle assessment. Final report of the EURENVIRON-LCAGAPS sub-project on land use*”. Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark, 2001.
- [94] Weidema B.P., Mortensen B., Nielsen P., Hauschild M. “*Elements of an Impact Assessment of Wheat Production*”. Institute for Product Development, 1996.
- [95] Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R. and Huijbregts M.A.J. “*Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards*”. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland. 2002.
- [96] Udo de Haes H.A, Joliet O., Finnveden G., Hauschild M., Muller-Wenk R. “*Best available practice regarding impact categories and category indicators in LCA (II)*”. International Journal of LCA, N°4(3). 1999.

- [97] Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R. and Huijbregts M.A.J. *“Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards”*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland. 2002.
- [98] Udo de Haes H.A, Jolliet O., Finnveden G., Huaschild M., Muller-Wenk R. *“Best available practice regarding impact categories and category indicators in LCA (II)”*. International Journal of LCA, N°4, 1999.
- [99] Guinée J. B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A.A.H., Weidema B. P.: *“Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards”*; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Netherlands, 2001.
- [100] ILCD *handbook: General guide for life cycle assessment – detailed guidance*, first edition, 2010, Institute for Environment and Sustainability, 2010
- [101] Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J. *“Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective”*. Ila y Iib: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, pág.692, 2002.
- [102] Environmental Protection Agency (EPA) *“Background for spatial differentiation in life cycle impact assessment: The EDIP2003 methodology”*, USA, 1994.
- [103] Bare J.C., Norris G.A., Pennington D.W., McKone T., *“TRACI, the Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts”*, Journal of Industrial Ecology, Volume 6, N°3–4, pág.49–77, 2003.
- [104] PréConsultants (Product Ecology consultants), PRé Sustainability, PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands, [http:// www.pre.nl](http://www.pre.nl)
- [105] Steen B., *“A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)”*, V. 2000 – General system characteristics, CPM report 1999:5.
- [106] Frischknecht R., Steiner R., Arthur B., Norbert E., Gabi H., *“Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006 the international Conference on EcoBalance”*, Tsukuba, Japan, November, 2006.
- [107] Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R., ReCiPe 2008, *“A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint. and the endpoint. level”*: First edition, Report I: Characterization., Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), Netherland, 2009.
- [108] Goedkoop M., Oele M., de Schryver A., Vieira M., SimaPro Database Manual, Methods library, v2.2, PRéConsultants, Netherland. 2008.

- [109] European Commission. "Methodology study Eco design of energy using products, MEEup methodology report", 2005.
- [110] American Society for Testing and Materials (ASTM) "Standard practice for applying the analytic hierarchy Process to Multi Attribute Decision Analysis (MADA) of investments related to buildings and building systems", ASTM designation E 1765-95, West Conshohocken, PA, USA. 1995.
- [111] Wackernagel M., "Ecological Footprint. and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Toward Sustainability". Dissertation, School of Community and Regional Planning, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1994.
- [112] Hauschild M.Z., Huijbregts M., Joliet O., Mcleod M., Margin M., Van De Meent D., Rosenbaum R.K, Mckone T.E., "Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony, Environmental Science and Technology", N°42, pág.7032–7037, 2008.
- [113] Koellner T. and Scholz R.W. "Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment, Part I: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change", The international Journal of Life Cycle Assessment N°12 (1) pág.16-23, 2007.
- [114] WBCSD and WRI. "Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard". Review Draft for Stakeholder Advisory Group. The Greenhouse Gas Protocol Initiative. November 2009.
- [115] Guinée J.B, Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., Van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., De Bruijn, H., Van Duin R., Huijbregts M.A.J. "Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background". Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, pág.692, 2002.
- [116] Huijbregts M.A.J., Breedveld L., Huppes G., De Koning A., Van Oers L., Suh S. "Normalization figures for environmental lifecycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the World (1990 and 1995)". Journal of Cleaner Production N°11 (7), pág.737-748, 2003.
- [117] PRé Consultants (Product Ecology consultants). PRé Sustainability, PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- [118] Ecoindicator 99, "Manual for Designers, damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment", Spatial Planning and the Environment, Netherland, 2000.
- [119] ILCD handbook: "Analyzing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment", first edition, Institute for Environment and Sustainability, Joint International Research Center, European Commission. 2010.
- [120] EPS methodology (Environmental Priority Strategies in product design), <http://eps.esa.chalmers.se/>.

- [121] Steen B., “A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)”, Version 2000 – General system characteristics, CPM report 1999:5.
- [122] Humbert S., Margni M., Joliet O., “A user guide for the New Life Cycle Impact Assessment Methodology IMPACT 2002+”, (for v2.1), 2005.
- [123] Sleeswijka A.W., Van Oersc L.F., Guinee J.B., Struijsd J., Huijbregtsb M.A.J., “Normalization in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000”, Science of the total environment pág.390, 2008.
- [124] Wackernagel M. “Ecological Footprint. and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Toward Sustainability” (PhD thesis). Vancouver, Canada: School of Community and Regional Planning. The University of British Columbia, 1994.
- [125] Koellner T., Scholz R. “Assessment of land use impact on the natural environment: Part I: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change”. int. J LCA N°12 (1), pág.16-23, 2007.
- [126] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fifth Assessment Report. The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. 2007.
- [127] USEtoxTM. The USEtox Team is a core team of international researchers from the Task Force on Toxic Impacts (TF LCIA 3) under the auspices of UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. Retrieved from www.usetox.org. 2009.
- [128] Hauschild M., Huijbregts M., Joliet O., Macleod M., Margni M., van de Meent D., Rosenbaum R., McKone T. “Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony”. Environm.Scienc. & Techn., N°42(19), 2008.
- [129] Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Joliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., Van de Meent D., Hauschild M.Z. *USEtox – the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater Eco toxicity in life cycle impact assessment.* int. J LCA N°13 (7), pág.532-546, 2008.
- [130] Laurent A., Lautier A., Rosenbaum R.K., Olsen S.I., Hauschild M.Z. “Normalization references for Europe and North America for application with USEtoxTM characterization factors”. int. J LCA N°16 (8), pág.728-738, 2011.
- [131] Boulay A.M., Bulle C., Bayart J.B., Deschenes L., Margni M. “Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health”. Environmental Science & Technology N°45, PÁG.8948-8957, 2011.
- [132] Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., Chapagain A.K., Mathews R.E., Richter B.D. “Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprint versus Blue Water Availability”. PLUS ONE N°7 (2), e32688. DOI:10.1371, 2012.

[133] Motoshita M., Itsubo N., Inaba A. “*Development of Impact Factors on Damage to Health by Infectious Diseases Caused by Domestic Water Scarcity*”. International Journal LCA N°16, pág.65-73, 2011.

[134] Pfister S., Koehler A., Hellweg S. “*Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA*”. Environmental Science and Technology, N°43 (11), pág.4098–4104; DOI: 10.1021/es802423e. 2009.

[135] Huijbregts M.A.J., Hellweg S., Frischknecht R., Hendrik H.W, Hungerbühler K., Hendriks, A.J. “*Cumulative Energy Demand as Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production*”, Environmental Science and Technology, N°44, pág.2189–2196, 2010.

[136] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T., Spielmann M. “*Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0*”. Ecoinvent report No. 3, Swiss center for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. 2007.

[137] Bösch M.E., Hellweg S., Huijbregts M.A.J., Frischknecht, R. “*Applying Cumulative Energy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database*”. International Journal LCA N°12 (3), pág.181–190, 2007.

[138] Dunn R., Hearps P., Wright M. “*Molten-Salt Power Towers: Newly Commercial Concentrating Solar Storage*”. IEEE, N°100, pág.504-515, 2012.

[139] CSP Today. “*CSP Solar Tower Report 2014: Cost, Performance and Thermal Storage*”, Technical Report, FC Business Intelligence, 2013.

[140] Burkhardt III John J., Heath G., Cohen E., “*Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation - Systematic Review and Harmonization*”, Journal of Industrial Ecology, N°16, S1, S93–S109. 2012.

[141] Viebahn P., Lechón Y., Trieb F. “*The Potential Role of Concentrated Solar Power (CSP) in Africa and Europe — A Dynamic Assessment of Technology Development, Cost Development and Life Cycle Inventories until 2050*”, Energy Policy, N°39, pág.4420-4430, 2011.

[142] Burkhardt JJ, Heath GA, Turchi CS. “*Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*”. Environmental Science & Technology, 2011.

[143] García-Olivares A., Ballabrera Poy J., García Ladona E., Turiel A. “*A global renewable mix with proven technologies and common materials*”. Energy Policy, pág.41-56, 2012.

[144] Gil A., Medrano M., Martorell I., Lazaro A., Dolado P., Zalba B., and Cabeza L., “*State of The Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1-Concepts, Materials and Modellization*,” Renewable & sustainable energy reviews, n°14 (1), pág.31-55. 2010.

- [145] Wagner S.J., *"Environmental and Economic Implications of Thermal Energy Storage for Concentrated Solar Power Plants"* Thesis, Carnegie Mellon University. 2011.
- [146] Steinmann W.B.J. *"Analysis of Thermal Storage Systems Using Modelica"*, Proc. 4th international Modelica Conference, G. Schmitz, ed., Hamburg University of Technology, Hamburg, pág.331-337. 2005,
- [147] Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. and Cabeza L.F. *"State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part I: Concepts, materials and modellization"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews N°14, pág.31-55, 2009.
- [148] Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. and Cabeza L.F. *"State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part I: Concepts, materials and modellization"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, N°14, pág.31-55. 2009.
- [149] Barlev D., Vidu R. & Stroeve P. Innovation in concentrated solar power, *"Solar energy materials and solar cells"*, N°95, pág.2703-2725. 2011.
- [150] Fernandes D., Pitie F., Caceres G. & Baeyens J. *"Thermal energy storage: How previous findings determine current research priorities"*, Energy, N°39, pág.246-257, 2012.
- [151] Gil A., Martorell I., Medrano M., Lazaro A., Dolado P., Zalba B. & Cabeza L.F. *"State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part I: Concepts, materials and modellization"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, n°14, pág.31-55, 2009.
- [152] Glatzmaier G. *"Summary Report for Concentrating Solar Power Thermal Storage Workshop"*. Technical report, NREL/TP-5500-52134, 2011.
- [153] Romero-Paredes H., Flamant G., Abanades S., Charvin P. and Ambriz J.J. *"Thermochemical storage of solar energy by means of sulfates: A review"*. Proceedings of the 13th SolarPACES Conference, Seville. 2006.
- [154] Turchi C., Concentrated Solar Power Program National Renewable Energy Laboratory, Washington DC. 2015.
- [155] Peng Q., Yang X., Ding J., Wei X., Yang J. *"Design of new molten salt thermal energy storage material for solar thermal power plant"*. Applications Energy. N°112, pág.682-689, 2015.
- [156] Kuravi S., Trahan J., Goswami D., Rahman M., Stefanakos E. *"Thermal Energy Storage Technologies and Systems for Concentrating Solar Power Plants"*. Program Energy Combust Science, N°39, pág.285-319, 2013.
- [157] Spiegel M., Mentz J. *"High Temperature Corrosion beneath Nitrate Melts"*. Materials and Corrosion, N°65, pág.276-281, 2014.

[158] Slusser J., Titcomb J., Heffelfinger M., Dunbobbin B. “*Corrosion in Molten Nitrate–Nitrite Salts*”. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS), N°37, pág.24-27, 1985.

[159] Goods S., Bradshaw R. “*Corrosion of Stainless Steels and Carbon Steel by Molten Mixtures of Commercial Nitrate Salts*”. Journal Mater Engineering Perform, N°13, pág.78-87, 2004.

[160] Fernandez A., Rey A., Lasanta I., Mato S., Brady M., Pérez Trujillo F.J. “*Corrosion of Alumina-Forming Austenitic Steel in Molten Nitrate Salts by Gravimetric Analysis and Impedance Spectroscopy*”. Material Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion. N°65, pág.267-275, 2014.

[161] Ding J., Yang J., Yang X. “*High-Temperature Thermal Stability of Molten Salt Materials*”. International Journal Energy Research, N°32, pág.1164-1174, 2008.

[162] William B. Stine and Geyer M., Power from the sun.: www.powerfromthesun.net, 2001.

[163] Klein Sharon J.W, Rubin Edward S. “*Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems*”, Energy Policy, 2013

[164] Turchi C., Mehos M. “*Current and Future Costs for Parabolic Trough and Power Tower Systems in the US Market*” Presented at SolarPACES 2010 Perpignan, France September 21-24, Sandia National Laboratories, 2010.

[165] Klein Sharon J.W, Edward S. Rubin. “*Life cycle assessment of greenhouse gas emissions, water and land use for concentrated solar power plants with different energy backup systems, Energy Policy, 2013*”

[166] Lechón Y., De la Rúa, C., and Sáez, R. “*Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solar Thermal Power Plants in Spain*”. Journal of Solar Energy Engineering, N°130 (2), 2008.

[167] Burkhardt J.J., Heath G.A. and Turchi C. S. “*Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*”. Environmental science and technology, N°45(6), pág.2457-64. American Chemical Society. doi:10.1021/es1033266, 2011.

[168] Heath G. A., Iii J.J.B., and Turchi C. S. “*Life Cycle Environmental Impacts Resulting from the Manufacture of the Heliostat Field for a Reference Power Tower Design in the United States*”. Proceedings of the SolarPaces 2012 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Marrakesh, Morocco. 2011.

[169] Damerau K., Keith Williges A.G., Gauché P.P., “*Costs of reducing water use of concentrating solar power to sustainable levels: Scenarios for North Africa*”, Energy Policy, 2011.

- [170] Bakker W.T. “*Materials for advanced boilers Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation*”, pág.435-444. 1999.
- [171] Xing J. D., Gao Y. M., Wang E. Z. and Bao C. G. (2002) *Wear*, num. 252, pág. 755-760. Hsu C. H., Lu J. K. and Tsai R. J. “*Surface and Coatings Technology*”, N°200, pág.5725-5732, 2006.
- [172] Frangini S. and Masci A. “*Surface and Coatings Technology*”, num. 184, pág. 31-39. Tschiptschin A. P., Garzón C. M. y López D. M. (2006) “*180 Years of Scratch Testing*”, *Tribology international*, N°39, pág.167-174, 2004.
Kamachi Mudali U., Bhuvaneshwaran N., Shankar P. y Raj B. “*Corrosion Science*”, N°46, pág.2867-2892, 2004.
- [173] Yang J. X., Zheng Q., Sun X. F., Guan H. R. y Hu Z. Q. *Scripta Materialia*, N°55, pág.331-334, 2006.
Geng, L., Na, Y. S. y Park, N. K. *Materials and Design*, N°28, pág.978-981, 2007.
- [174] Lee J. W. y Kuo Y. C. *Surface and Coatings Technology*, N° 200, pág.1225-1230, 2005. Leiden, Netherland, 1995.
- [175] Inchaurza, A. “*Influencia de los elementos en aceros inoxidable y refractarios*”. Olsa (Olarra, S.A.), Vizcaya, 1971.
- [176] Calvo Rodes, R. “*El acero, su elección y selección*”. I.N.T.A. Madrid, 1956.
- [177] Beddoes J. and Parr J.G. “*A Review of Stainless Steel: What are they; What they do. Introductions to Stainless Steel*”. American Society for Microbiology: Washington D.C., 1.999.
- [178] Thompson M., Ellis R. and Wildavsky A., *Cultural Theory*. Westview Press, Boulder, Co, 1990.
- [179] Sleeswijk A.W., van Oers L.F., Guinée J.B., Huijbregts M.A.J. “*Normalization in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000*”. *Science Total Environmental* N°390 (1), pág.227-240, 2007.
- [180] Tao Wang, Divakar M., and Ramana G. Reddy, “*Novel low melting point. quaternary eutectic system for solar thermal energy storage*”, *Applied Energy*, N°102, pág.1422-1429, 2013.
- [181] Olivares R.I. “*The thermal stability of molten nitrite/nitrates salt for solar thermal energy storage in different atmospheres*”, *Solar Energy Journal*, N°86, pág.2576–2583, 2012.
- [182] Bates J., “*Control of heat transfer salts*”. Haudry Process Corporation, 1940.
- [183] Kalichevsky V., “*Treatment of heat transfer salts II*”, 1940.
- [184] Walter, R.J., “*Salt corrosion inhibitors*”, 1985.

- [185] Medrano M. et al., “*State of the Art on High-Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation.*” Part.2, Case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- [186] Bradshaw R.W., N.S., “*Molten nitrate salt development for thermal energy storage in parabolic trough solar power system. Energy Sustainability*”, 2008.
- [187] Bradshaw R.W. and Meeker D.E., “*High-temperature stability of ternary nitrate molten salts for solar thermal energy systems*”. Solar Energy Materials, pág.51-60, 1990.
- [188] Justin W., Raade D.P., “*Development of molten salt heat transfer fluid with low melting point. and high thermal stability*”. SolarPACES 2010.
- [189] Hoshi A., Mills D. R., Bittar A., Saitoh T. S., Solar Energy, N°79, pág.3332, 2005.
- [190] Bradshaw R.W. and Tyner C.E., “*Chemical and Engineering Factors Affecting Solar Central Receiver Applications of Ternary Molten Salts*”, Sandia National Laboratories, 1988.
- [191] Bradshaw R. W. and Tyner C. E., “*Chemical and Engineering Factors Affecting Solar Central Receiver Applications of Ternary Molten Salts*”, Sandia National Laboratories, 1988.
- [192] Robert W. Bradshaw and Nathan P. Siegel. “*Molten nitrate salt development for thermal energy storage in parabolic trough*”. Proceedings of ES2008 Energy Sustainability 2008 August 10-14, Jacksonville, Florida USA SOLAR POWER SYSTEMS, 2008.
- [193] Picard G., “*Process for stabilizing a mixture of molten alkali metal nitrates and alkali metal nitrites usable particularly as a heat transfer fluid and stabilized mixture thus obtain*”, 1985.
- [194] Nordberg, G., Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad, ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO, Tomo 2, Capítulo 63, 2001.
- [195] Roberge P.R. “*Handbook of Corrosion Engineering*” McGraw-Hill 2ªEd., 2012.
- [196] Birks N., Meier G.H., and Pettit F.S., “*Introduction to The High-Temperature Oxidation of Metals*”. 2nd ed., New York: Cambridge University Press. 2006.
- [197] Kofstad P., “*High-Temperature Oxidation of Metals*”. 1966.
- [198] West J.M., “*Basic Corrosion and Oxidation*”. 2ª edit., Chichester: Ellis Horwood Limited, 1986.
- [199] Uhlig H.H., “*Initial oxidation rate of metals and the logarithmic equation*”. Acta metallography, N°4, pág.541-554, 1956.
- [200] Pieraggi B.; “*Oxidation of Metals*”, Vol. 27, N° 3-4 pág.177-185, 1987

- [201] Haycock E.W., “*Transitions from parabolic to linear kinetics in scaling of metals*”. Electrochemical society, N°106 pág.771-775, 1959.
- [202] Brady G.S., Clauser H.R., Vaccari J.A., Materials Handbook, 15th ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [203] Wagner C., “*Contributions to the theory of the Tarnishing process. Physical and chemical*”, pág.25-41. 1933.
- [204] Kelly B. “*Lessons Learned, Project History and Operating Experience of the Solar Two Project*”. SAND2000-2598, 2000.
- [205] Kearney D., Kelly B., Herrman U., Cable R., Pacheco J., Mahoney R., Price H., Blake D., Nava P. and Potrovitza N. “*Engineering Aspects of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Trough Solar Field*” Energy N°29, pág.861-870, 2004.
- [206] Goods S.H, Bradshaw R.W. “*Corrosion of Stainless Steels and Carbon Steel by Molten Mixtures of Commercial Nitrate Salts*” Journal of Materials Engineering and Performance N°13 (1), pág.77-87, 2004.
- [207] Pacheco J.E. *Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project*. SAND2002-0120, 2002.
- [208] Delameter W.R. and Bergen, N.E. Review of Molten Salt Electric Experiment: Solar Central Receiver Project. SAND 86-8249, Sandia National Laboratory, Albuquerque, 1990.
- [209] Peng Q., Ding J., Wei X., Yang J., Yang X. Applied Energy Vol.87, pág.2812–2817, 2010.
- [210] Bradshaw RW. “*Viscosity of Multi-Component Molten Nitrate Salts—Liquidus to 200°C*”. Sandia Report SAND2010-1129, 2010.
- [211] Hatt B.W., Lovering D.G., “*Molten Salt Technology*” Editor, Plenum Press, pág. 438, 1982.
- [212] Jordan J., McCarthy W.B., Zambonin P.G., Mamantov G. “*Molten Salts*” Editor, Academic Press, pág.575, 1969.
- [213] Singh I. B., “*The effect of NaCl addition on the corrosion of mild steel in NaNO₃ Melt*”. Corrosion Science, USA, N°34 (10), pág.1733-1742, 1993.
- [214] Palmisano F., “*Catalytic currents in fused salts: Discharge mechanism of nitrite in molten alkali nitrates(II)*”. Journal of Electroanalytical Chemistry and interfacial Electrochemistry, N°89 (2), pág.311-320, 1978.
- [215] Kramer C.M., Munir Z.A., and Volponi J.V., “*Screening tests of sodium nitrate and potassium nitrate decomposition. Solar Energy*”, N°29 (5), pág.437-439, 1982.

- [216] Zimnol M., “*Structure and Morphology of MgFe₂O₄ Epitaxial Films Formed by Solid State Reactions on MgO Surfaces. Solid State Ionics*”, pág.667-672, 1997.
- [217] Kelly B. “*Lessons Learned, Project History and Operating Experience of the Solar Two Project*”. SAND2000-2598, 2000.
- [218] Ecoinvent S y U v.3 Database Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/documentation/reports>.
- [219] Kuravi S., Jamie Trahan J., Goswami D.Y., Rahman M.M., Stefanakos E.K., “*Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power Plants*”. Progress in Energy and Combustion Science, N°39, pág.285-319, 2013.
- [220] Gimenez P., Fereres S. “*Effect of heating rates and composition on the thermal decomposition of nitrate based molten salts*” Energy Procedia Vol.69, pág.654–662, 2015.
- [221] Viebahn P., *Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants, Project no: 502687, NEEDS*. (bibliografía inventario 19 MW_e), 2008.
- [222] Craig T., Parthiv K., Sertac A., and Flores F. “*Domestic Material Content in Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants*”, Technical Report NREL/TP-5500-64429, August 2015.
- [223] Kelly B. Lessons Learned, “*Project History and Operating Experience of the Solar Two Project*”. SAND2000-2598, 2000.
- [224] Viebahn P, Kronshage S., Trieb F., Lechon Y. “*Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants*”, DLR, CIEMAT, pág.88, 2004.
- [225] Turchi C., Kurup P., Akar S., and Flores F. ” *Domestic Material Content in Molten-Salt Concentrating Solar Power Plants*”. Technical Report NREL/TP-5500-64429 August 2015.
- [226] Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. and van Zelm R. ReCiPe 2008. “*A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonized Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*”, 2009.
- [227] Environmental Protection Agency. EPA -U.S. “*Life cycle assessment: principles and practice*”. Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006.